



Pedro Jorge Lopes Fernandes

Licenciatura em Ciências de Engenharia Mecânica

**Avaliação de vários indicadores na
detecção e localização de dano em
estruturas, utilizando as Funções de
Resposta em Frequência**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Raquel Albuquerque Soares Brás de Almeida
Professora Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

setembro 2019

Avaliação de vários indicadores na deteção e localização de dano em estruturas, utilizando as Funções de Resposta em Frequência

Copyright © Pedro Jorge Lopes Fernandes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Na reta final desta importante etapa do meu percurso acadêmico, surge a necessidade de deixar umas palavras de apreço a determinadas pessoas, cruciais para a realização da mesma.

Em primeiro lugar, à professora Raquel Almeida, pela preocupação constante e ajuda incansável. Um profundo obrigado por todas as palavras de incentivo em situações de maior desânimo e por todas as conversas travadas que me motivaram a fazer um melhor trabalho. Graças a si, tornei-me uma pessoa mais organizada e “com mais cabeça”.

Aos meus pais, pois sem eles nada disto seria possível. Agradeço-vos por todos os valores inculcados e pelo apoio incondicional, fazendo de mim a pessoa que sou hoje. Tenho muito orgulho em vocês. Um obrigado ainda aos meus irmãos pelo apoio e companhia, mesmo que a centenas ou milhares de quilómetros de distância.

Aos meus avós e ao Sr. Luciano, que também um avô foi para mim. A vós, por todo o interesse e incentivo, dedico parte desta dissertação, sabendo que se estivessem todos cá, se iriam orgulhar muito de me ver formado.

Aos meus colegas de Mecânica, por todo o companheirismo demonstrado em situações mais adversas. Agradeço por sempre terem estado presentes, não só nas gargalhadas e copos, como também nas noites de estudo pela faculdade, tornando este percurso memorável. Um especial obrigado ao José Figueira, Igor Trindade, Tomás Cavaco e David Negrão, que acredito serem amigos para a vida.

Ao João Alves e ao Gil Campos, por serem os melhores colegas de casa que podia ter tido. Um obrigado a vocês por todas as experiências que partilhámos juntos.

À família Azevedo, por todo o carinho e por todo o apoio. Um muito obrigado a todos vocês e, em especial, à tia Lurdes, pela convivência e conselhos, fazendo-me sentir sempre numa segunda casa.

Por último, mas não menos importante, à Marta, por todo o carinho, paciência e incessante apoio. Sem ti também nada disto seria possível. Um especial obrigado por seres a confidente e a companheira de tantos bons momentos, sem, no entanto, nunca descurares toda a insistência para não me descuidar dos deveres da faculdade.

Resumo

O dano pode ser visto como um enfraquecimento de uma estrutura, podendo comprometer o funcionamento da mesma. A detecção do mesmo é crucial, existindo, na área da engenharia, diversos métodos que permitem fazer uma identificação do dano na estrutura.

Com o objetivo de detetar, localizar e quantificar relativamente o dano, escolheram-se as Funções de Resposta em Frequência (FRFs) como base de informação para uma identificação eficaz do dano. Estas descrevem a resposta dinâmica do sistema quando aplicada uma força excitadora, numa gama de frequência pré-definida. A sua utilização apresenta inúmeras vantagens, destacando-se a sua facilidade de obtenção.

De forma a testar a aplicabilidade das FRFs na identificação do dano, simulou-se numericamente uma viga e obtiveram-se as FRFs referentes às translações e rotações, para a situação com e sem dano. Para tal consideraram-se doze pontos de medição (acelerómetros), sendo estes, ao mesmo tempo, possíveis pontos de aplicação de forças. Para a utilização e gestão da informação das FRFs, foi desenvolvida uma metodologia inovadora, de modo a aplicar diferentes indicadores que efetuam a correlação entre as curvas das FRFs com e sem dano e assim conseguir-se identificar o dano.

Com o objetivo de melhorar a identificação do dano, foram estudados os efeitos da variação da localização/grau de dano, da gama de frequências considerada, do número de forças aplicadas, do número de pontos de medição considerados e, finalmente, a possibilidade de efetuar a detecção de múltiplos danos.

Todos os resultados e conclusões obtidos nesta dissertação têm como intuito contribuir para o desenvolvimento científico na área da identificação do dano.

Palavras chave: Detecção, Localização e Quantificação de dano, Métodos baseados em Vibrações Mecânicas, Funções de Resposta em Frequência

Abstract

Damage can be understood as a weakening of a structure and may compromise its functioning. Damage detection is crucial, and there are several methods in the engineering area that can allow that identification.

In order to detect, locate and quantify the damage relatively, Frequency Response Functions (FRFs) were chosen as the basis for effective damage identification. These describe the dynamic response when an exciting force is applied over a predefined frequency range. Its use has numerous advantages, especially its ease of obtaining.

In the interest of testing the applicability of FRFs for damage identification, a beam was numerically simulated and FRFs related to translations and rotations were obtained for the situation with and without damage. To do so twelve measurement points (accelerometers) were considered, and these, at the same time, possible points of application forces. For the use and management of FRF information, an innovative methodology has been developed to apply different indicators that correlate FRF curves with and without damage, so that damage can be identified.

To improve the identification of damage, the effects of varying the location/degree of damage, the frequency range considered, the number of forces applied, the number of measurement points considered and the possibility of performing the damage detection of multiple damages were studied in this work.

All results and conclusions obtained in this dissertation are intended to contribute to the scientific development in the area of damage identification.

Key words: Detection, Localization e Quantify the damage, Mechanical Vibration Based Methods, Frequency Response Functions

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xvii
Nomenclatura	xxi
Siglas e Acrónimos	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização e Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	2
2 Métodos e conceitos associados à identificação de dano	5
2.1 Estado de arte sobre identificação de dano	5
2.2 Categorização e classificação de métodos de deteção de dano que utilizam vibrações mecânicas	9
2.3 Conceitos teóricos dos métodos tradicionais	10
2.3.1 Frequências naturais	10
2.3.2 Modos de vibração	13
2.3.3 Funções de resposta em frequência	15
2.3.4 Transmissibilidade	21
2.4 Métodos “inteligentes” de deteção de dano	23
3 Nova metodologia aplicada a um modelo numérico	25
3.1 Aplicação do método dos elementos finitos	25
3.2 Propriedades modais da estrutura	30
3.3 Implementação do amortecimento proporcional	32
3.4 Implementação do ruído aleatório	32
3.5 Implementação do dano	33
3.5.1 Modelação do elemento danificado	33
3.5.2 Efeito do dano	36

3.6	Metodologia aplicada para a detecção e localização de dano	37
3.6.1	Descrição dos indicadores utilizados para a identificação de dano.....	37
3.6.2	Metodologia desenvolvida	39
4	Casos de estudo.....	45
4.1	Caso de estudo 1 – Otimização dos ensaios	45
4.2	Caso de estudo 2 – Efeito da localização, nível de dano e presença de ruído nas FRFs	50
4.2.1	Efeito da presença de ruído.....	51
4.2.2	Eficácia dos indicadores na localização dano	55
4.2.3	Eficácia dos indicadores na detecção e quantificação relativa do dano.....	60
4.3	Caso de estudo 3 - Influência da gama de frequências estudada para a localização do dano	62
4.4	Caso de estudo 4 - Influência da escolha das forças a aplicar para a localização do dano	68
4.5	Caso de estudo 5 - Localização de vários danos em simultâneo	74
4.6	Caso de estudo 6 - Influência do número de pontos de medição	78
5	Conclusão	83
5.1	Trabalhos propostos	85
6	Bibliografia.....	87

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Causas de dano [2].....	6
Figura 2.2 - Naufrágio do navio <i>Prestige</i>	7
Figura 2.3 – Técnicas convencionais dos Ensaios Não Destrutivos	8
Figura 2.4 - Comparação dos gráficos da parte real e imaginária para uma FRF do tipo recetância (a), mobilidade (b) e aceleração (c) de um sistema SDOF [22]	17
Figura 2.5 - Sistema com a representação das coordenadas A , U e K [34]	22
Figura 3.1 - Representação de um domínio bidimensional com condições fronteira, tração t e deslocamentos u (esquerda), com a respetiva malha EF (direita) [39]	26
Figura 3.2 - Modelo da viga.....	26
Figura 3.3 - Elemento de viga bidimensional com 4 GDL.....	28
Figura 3.4 - Modos de Flexão	31
Figura 3.5 - Modos de Rotação	31
Figura 3.6 - Comparação entre o 3º modos de flexão e de rotação da viga	31
Figura 3.7 - Efeito do amortecimento	32
Figura 3.8 - Modelo da secção transversal de um elemento da viga.....	33
Figura 3.9 - Esquema geral para a obtenção do segundo momento de área de uma secção retangular [40].....	34
Figura 3.10 - Esquema representativo dos eixos para a secção transversal após redução de espessura	34
Figura 3.11 - Secção transversal de um elemento, caso se calculasse segundo momento de área em torno C.M.	36
Figura 3.12 - Comparação das FRFs de translação (A5_5) entre uma estrutura com e sem dano	37
Figura 3.13 - Esquematisação da metodologia desenvolvida	41
Figura 4.1 - Esquema da viga com a posição dos sensores (mm)	46

Figura 4.2 - GDL associados a cada acelerómetro	46
Figura 4.3 - Esquema da malha da viga considerando N_e igual a 3	47
Figura 4.4 - Esquema da malha da viga considerando a adição das coordenadas dos pontos de medição	47
Figura 4.5 – Sensibilidade do indicador da Razão em função do número de elementos utilizado, considerando uma dano a 34cm com uma redução de espessura de 15%	49
Figura 4.6 - Somatório das discrepâncias medidas pelo Coe, em função do número de elementos utilizado, considerando uma dano a 34cm com uma redução de espessura de 15%	49
Figura 4.7 - Representação da localização das várias situações de dano	50
Figura 4.8 - Comparação entre os gráficos dos vetores de translação (à esquerda) e rotação (à direita) para a situação da presença ou não de ruído nas FRFs utilizadas, considerando uma redução de espessura de 5%	52
Figura 4.9 - Comparação entre dois ensaios diferentes com uma redução de espessura de 2% (esquerda) e 10% (direita)	53
Figura 4.10 - Comparação do valor da Razão _{1_1} ao longo da frequência, considerando a amostra limpa (esquerda) ou com 2% de ruído (direita), com uma redução de espessura de 10%	53
Figura 4.11 – Comparação do valor do Coe _{1_1} ao longo da frequência, considerando a amostra limpa (esquerda) ou com 2% de ruído (direita), com uma redução de espessura de 10%	54
Figura 4.12 - Comparação entre a detecção com base nas médias de 5 ensaios e a média de 5 FRFs, para a Razão (esquerda) e para o Erro (direita)	55
Figura 4.13 – Representação gráfica dos resultados obtidos, para o indicador da Razão, considerando o dano localizado a 14cm (esquerda) e 34cm (direita), com nível de dano de 5 e 10%, relativamente à translação (superior) e rotação (inferior)	56
Figura 4.14 – Representação gráfica dos resultados obtidos, para o indicador do Erro, considerando o dano localizado a 14cm (esquerda) e 34cm (direita), com nível de dano de 5 e 10%, relativamente à translação (superior) e rotação (inferior)	57
Figura 4.15 - Representação gráfica dos resultados obtidos, para o indicador CSF, considerando o dano localizado a 14cm (esquerda) e 34cm (direita), com nível de dano de 5 e 10%, relativamente à translação (superior) e rotação (inferior)	57

Figura 4.16 - Representação gráfica dos resultados obtidos, para o indicador Coe, considerando o dano localizado a 14cm (esquerda) e 34cm (direita), com nível de dano de 5 e 10%, relativamente à translação (superior) e rotação (inferior)	58
Figura 4.17 - Evolução da detecção de dano com a incrementação da percentagem de redução de espessura para os vetores de translação e rotação, aplicando cada indicador	61
Figura 4.18 - Influência da gama de frequências estudada para um dano com uma redução de espessura de 5%, localizado a 5cm (esquerda) ou a 50cm (direita), com base no vetor das translações	65
Figura 4.19 - Influência da gama de frequências estudada para um dano com uma redução de espessura de 5%, localizado a 5cm (esquerda) ou a 50cm (direita), com base no vetor das rotações	67
Figura 4.20 – Resultados para o indicador da Razão, considerando o dano a 14cm, com um redução de espessura de 5%	71
Figura 4.21 - Resultados para o indicador da Erro, considerando o dano a 14cm, com um redução de espessura 5%	72
Figura 4.22 - Resultados para o indicador da Erro, considerando o dano a 34cm, com um redução de espessura 5%	72
Figura 4.23 - Resultados para o indicador da Erro, considerando o dano a 50cm, com um redução de espessura 5%	72
Figura 4.24 - Resultados para o indicador Coe, considerando o dano a 5cm, com um redução de espessura 5%	73
Figura 4.25 - Resultados para o indicador Coe, considerando o dano a 50cm, com um redução de espessura 5%	73
Figura 4.26 - Representação gráfica dos resultados obtidos, para o indicador da Razão, considerando o dano com uma redução de espessura de 10%, localizado a 5 e 94cm, relativamente à translação (esquerda) e rotação (direita).....	75
Figura 4.27 - Representação gráfica dos resultados obtidos, para o indicador do Erro, considerando o dano com uma redução de espessura de 10%, localizado a 5 e 94cm, relativamente à translação (esquerda) e rotação (direita).....	76

Figura 4.28 - Comparação entre danos simultâneos, alterando a posição de um deles ao longo do mesmo elemento, considerando o indicador Coe para as FRFs de rotação e um nível de dano de 10%	76
Figura 4.29 - Representação gráfica dos resultados do indicador Coe, base nas FRFs de rotação, para o caso do dano localizado a (14 e 24 cm), com uma redução de espessura de 10%.	77
Figura 4.30 - Representação gráfica dos resultados do indicador Coe, com base nas FRFs de rotação, para o caso do dano localizado a (14 e 34 cm), com uma redução de espessura de 10%.....	78
Figura 4.31 - Comparação entre os resultados da Razão, considerando FRFs de translação, com 22 ou 12 acelerômetros, considerando um dano localizado a 14cm, com uma redução de espessura de 10%	81
Figura 4.32 - Comparação entre os resultados da Razão, considerando FRFs de translação, com 22 acelerômetros, para o caso de 22 e 12 forças, considerando um dano localizado a 14cm, com uma redução de espessura de 10%	81

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Propriedades geométricas da viga.....	27
Tabela 3.2 - Propriedades do material constituinte da viga	27
Tabela 3.3 - Frequências Naturais da viga	30
Tabela 4.1 - Dados relativos à posição e numeração dos sensores	46
Tabela 4.2 - Variáveis e valores estudados para efetuar a análise da convergência de malha	48
Tabela 4.3 - Localização dos danos	50
Tabela 4.4 - Níveis de dano aplicados e respectivas reduções de espessura.....	51
Tabela 4.5 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 10% de redução da espessura, consoante o indicador e a localização do dano, considerando FRFs de rotação	59
Tabela 4.6 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 10% de redução da espessura, consoante o indicador e a localização do dano, considerando FRFs de translação ...	59
Tabela 4.7 - Gamas de frequência estudadas	62
Tabela 4.8 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 5% de redução da espessura da viga, em diferentes localizações, obtidos com o indicador Razão, para diferentes gamas de frequência estudada, quando foram utilizadas as FRFs de translação.....	63
Tabela 4.9 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 5% de redução da espessura da viga, em diferentes localizações, obtidos com o indicador Erro, para diferentes gamas de frequência estudada, quando foram utilizadas as FRFs de translação.....	63
Tabela 4.10 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 5% de redução da espessura da viga, em diferentes localizações, obtidos com o indicador CSF/Coe, para diferentes gamas de frequência estudada, quando foram utilizadas as FRFs de translação.....	63
Tabela 4.11 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 5% de redução da espessura da viga, em diferentes localizações, obtidos com o indicador Razão, para diferentes gamas de frequência estudada, quando foram utilizadas as FRFs de rotação	66
Tabela 4.12 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 5% de redução da espessura da viga, em diferentes localizações, obtidos com o indicador Erro, para diferentes gamas de frequência estudada, quando foram utilizadas as FRFs de rotação	66

Tabela 4.13 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 5% de redução da espessura da viga, em diferentes localizações, obtidos com o indicador CSF/Coe, para diferentes gamas de frequência estudada, quando foram utilizadas as FRFs de rotação	66
Tabela 4.14 - Mapa de Cores para a Razão, baseado nas FRFs de translação, considerando o dano localizado a 34cm (entre os GDL 7 e 9), com uma redução de espessura de 10%	68
Tabela 4.15 - Mapa de Cores para a Razão, baseado nas FRFs de rotação, considerando o dano localizado a 34cm (entre os GDL 8 e 10), com uma redução de espessura de 10%	69
Tabela 4.16 - Mapa de Cores para o Erro, baseado nas FRFs de rotação, considerando o dano localizado a 34cm (entre os GDL 8 e 10), com uma redução de espessura de 10%	69
Tabela 4.17 - Mapa de Cores para o Erro, baseado nas FRFs de rotação, considerando o dano localizado a 34cm (entre os GDL 8 e 10), com uma redução de espessura de 10%	69
Tabela 4.18 - Mapa de Cores para a Razão, baseado nas FRFs de rotação, considerando o dano localizado a 14cm (entre os GDL 4 e 6), com uma redução de espessura de 10%	70
Tabela 4.19 - Quadro resumo dos casos onde se variou as forças de excitação aplicadas.....	70
Tabela 4.20 - Posição dos danos para ensaios com múltiplos danos.....	74
Tabela 4.21 - Quadro resumo da eficácia na localização de dois danos em simultâneo, ambos com 10% de redução da espessura, para cada indicador e localização, utilizando nas FRFs de translação.....	74
Tabela 4.22 - Quadro resumo da eficácia na localização de dois danos em simultâneo, ambos com 10% de redução da espessura, para cada indicador e localização, utilizando as FRFs de rotação	75
Tabela 4.23 - Localização dos novos acelerómetros utilizados	79
Tabela 4.24 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 10% de redução da espessura, para cada indicador e localização baseado nas FRFs de translação, considerando 22 pontos de medição.....	80
Tabela 4.25 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 10% de redução da espessura, para cada indicador e localização baseado nas FRFs de rotação, considerando 22 pontos de medição.....	80

Tabela 4.26 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 10% de redução da espessura, para cada indicador considerando dois danos localizados a (14 e 24)cm e 22 pontos de medição	82
---	----

Nomenclatura

ω	Frequência
K	Rigidez
M	Massa
$\Delta\omega_A$	Variação das frequências em A
S	Sensibilidades
ϕ	Modo de vibração
*	Complexo conjugado
Ψ	Modo de vibração com base em extensão
C	Amortecimento
x	Deslocamento
\dot{x}	Velocidade
\ddot{x}	Aceleração
F	Força de excitação
Z	Rigidez Dinâmica
H	Recetância
H_j	Modo operacional de vibração
H_i	Ponto i do modo operacional de vibração
Y	Mobilidade
A	Acelerância
H''	2ª derivada da recetância (curvatura)
u_{norm}	Normalização à unidade
+	Pseudo-inversa
T	Transmissibilidade

L	Comprimento
b	Espessura
a	Largura
A_t	Área da secção transversal da viga
I_x	2º momento de área
E	Módulo de Young
G	Módulo de elasticidade transversal
ρ	Densidade
ν	Coeficiente de Poisson
W^e	Deslocamento vertical
θ^e	Rotação
d_e	Vetor de deslocamento
K_e	Rigidez local
M_e	Massa local
b'	Espessura do elemento danificado
A_d	Área do elemento danificado
d	Distância
i	Ponto de medição
j	Força aplicada
t	Instante de tempo

Siglas e Acrónimos

ASDM	<i>Absolute Difference Strain ModeShape</i>
CD	Com Dano
CM	Centro de Massa
Coe	Coerência
COMAC	<i>Co-ordinate Modal Assurance Criterion</i>
CSF	<i>Cross Signature Scale Factor</i>
DI	<i>Damage Index</i>
DLAC	<i>Damage Location Assurance Criterion</i>
EF	Elemento Finito
END	Ensaio Não Destrutivo
FDAC	<i>Frequency Domain Assurance Criterion</i>
FRAC	<i>Frequency Response Assurance Criterion</i>
FRF	Funções de Resposta em Frequência
FRF_MSC	<i>FRF based Mode Shaped Curvature</i>
FRF_MSCS	<i>FRF based Mode Shaped Curvature Square</i>
GDL	Graus de Liberdade
IDBV	Identificação de Dano Baseados em Vibrações
IDDM	<i>Interpolation Damage Detection Method</i>
MAC	<i>Modal Assurance Criterion</i>
MDLAC	<i>Multi Damage Location Assurance Criterion</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MOV	Modo Operacional de Vibração
MSCS	<i>Mode Shape Curvature Square</i>

Ne	Número de elementos
NFN	Normalização das Frequências Naturais
RNA	Redes Neurais Artificiais
RVAC	<i>Response Vector Assurance Criterion</i>
SD	Sem Dano
SDOF	<i>Single Degree of Freedom</i>
TDI	<i>Transmissibility Damage Indicator</i>
WDI	<i>Weighted Damage Indicator</i>

1 Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

Acoplado ao avanço tecnológico que se fez sentir nas últimas décadas, surge um aumento do número, da dimensão e da complexidade de novos equipamentos e estruturas. No entanto, associado a este crescimento abrupto, ocorreram várias catástrofes/acidentes provenientes do colapso das estruturas. De modo a evitar que tal aconteça, implementaram-se várias regras e regulamentos por forma a garantir a segurança da vida humana, a fiabilidade das estruturas e a redução de prejuízos económicos, inerentes à paragem do funcionamento das estruturas e ou equipamentos. Todos estes acontecimentos vieram dar uma maior importância ao papel da identificação precoce de dano na área da Engenharia Estrutural.

O fenómeno da fadiga é um dos principais fatores que contribui para o colapso de uma estrutura e está associado, muitas vezes, ao efeito que as vibrações mecânicas produzem na mesma. No entanto, a utilização de métodos baseados nestas pode trazer inúmeras vantagens na identificação de dano, pois permitem uma monitorização contínua e global da estrutura, capaz de detetar o dano e intervir numa fase precoce.

Dentro das vibrações mecânicas, destacam-se as funções de resposta em frequência (FRF), que irão ser o foco do trabalho em questão, tentando-se, a partir delas, conseguir detetar, localizar e também quantificar de forma relativa o dano numa estrutura em estudo. As FRFs podem assim ser obtidas diretamente para uma gama de frequências pretendida, permitindo reproduzir diretamente a resposta do sistema para cada uma dessas frequências. Em oposição ao uso dos modos de vibração, que necessitam de uma identificação modal prévia, contendo apenas a informação do modo associado à frequência natural.

1.2 Objetivos

No trabalho em questão, pretendeu-se investigar qual o potencial da utilização das FRFs na deteção, localização e quantificação relativa de dano numa estrutura.

Para conseguir tal intento, teve de ser desenvolvida uma metodologia que permitisse comparar as FRFs de uma estrutura com e sem dano. Para tal, foram testados diversos indicadores que permitem fazer a correlação entre duas curvas, neste caso, as curvas das FRFs com e sem dano.

Compararam-se ainda os resultados obtidos a partir da aplicação desta metodologia, utilizando FRFs de translação ou de rotação. Adicionalmente teve-se como objetivo, testar o efeito produzido pela gama de frequências utilizada, pelo número de forças aplicadas e pelo número de pontos de medição (acelerómetros) considerados.

As FRFs da estrutura em estudo, para as situações com e sem dano, foram obtidas por simulação numérica através do Método dos Elementos Finitos (MEF).

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação em causa estará dividida em cinco capítulos, estando estes descritos nesta secção de uma forma sucinta.

Capítulo 1 – **Introdução**: neste capítulo é feita a contextualização e a motivação para a realização do estudo efetuado, assim como a definição dos objetivos a alcançar.

Capítulo 2 – **Métodos e Conceitos Associados à Identificação do Dano**: neste capítulo é apresentada uma revisão do estado de arte das metodologias usadas para a identificação de dano e são apresentados alguns conceitos teóricos fundamentais, tais como o conceito de dano e FRFs, essenciais à compreensão dos capítulos seguintes.

Capítulo 3 – **Nova Metodologia Aplicada a um Modelo Numérica**: neste capítulo é explicado como foi feita a simulação da estrutura em causa, bem como a assemblagem das matrizes de rigidez/massa, a implementação do efeito do amortecimento e a introdução do dano na estrutura.

Capítulo 4 – **Casos de Estudo:** neste capítulo são apresentados quais os casos de estudo investigados, os resultados obtidos e as conclusões a retirar dos mesmos.

Capítulo 5 – **Conclusão:** neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais do trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

2 Métodos e conceitos associados à identificação de dano

2.1 Estado de arte sobre identificação de dano

Antes de se estudar o que é e o que implica a identificação de dano, é necessário primeiramente perceber o que é o dano.

Segundo Zaher [1], o dano pode ser considerado como um enfraquecimento indesejado na estrutura, produzindo um efeito negativo no seu desempenho, afetando, assim, a segurança da mesma, num período atual ou futuro. Dano pode ainda ser definido como qualquer desvio das propriedades geométricas ou materiais originais da estrutura, podendo produzir esforços indesejados, deslocamentos, ou mesmo vibrações na estrutura.

O dano/defeito pode ser caracterizado segundo três categorias: Morfologia, Localização e Extensão. Segundo a componente morfológica, o dano pode ser considerado como esférico, fissura ou, então, uma descontinuidade física ou uma delaminação. Na localização, este pode ser caracterizado como superficial, sub-superficial ou em volume. Finalmente, na extensão tem-se como objetivo perceber a dimensão do defeito [2].

Um defeito/dano pode ser causado por inúmeras razões. Na Figura 2.1 está representado um esquema resumo por forma a perceber melhor algumas das causas.

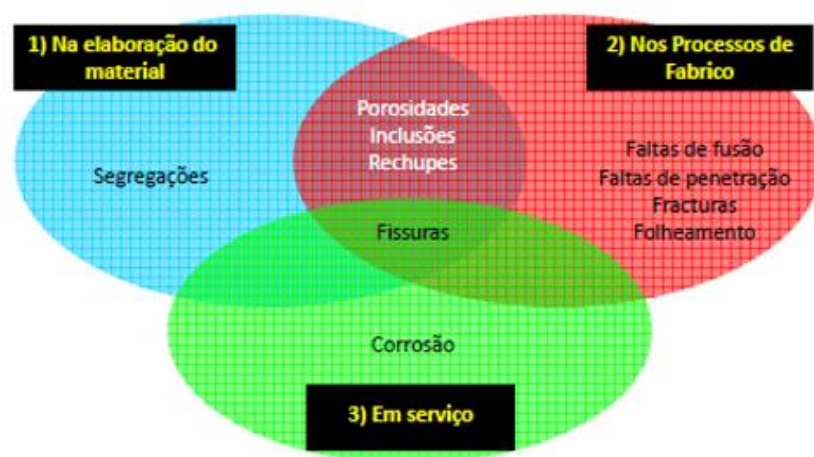


Figura 2.1 - Causas de dano [2]

Por sua vez, o efeito que o dano causa numa estrutura pode ser classificado como linear ou não linear. Bandara *et al.* [3] afirma que uma situação de dano linear é definida como aquela onde uma estrutura, que apresenta inicialmente um comportamento linear-elástico, permanece com o mesmo comportamento após o dano. Bakhary *et al.* [4] define que o dano não linear existe quando uma estrutura começa por apresentar um comportamento linear-elástico e, após o dano, passa a apresentar um comportamento não linear. No entanto, é de notar que a maioria dos casos de estudo na literatura apenas reporta casos de dano linear.

Tendo agora uma ideia do que é um dano e do que este representa, é de suma importância monitorizar as estruturas, de forma a detetar possíveis danos numa fase o mais precoce possível, sendo pois esta uma questão de grande importância em áreas como a indústria mecânica, civil e na indústria aeroespacial.

O aumento da complexidade das estruturas exige um maior controlo e uma inspeção minuciosa. Através de uma monitorização contínua das estruturas é possível avaliar a integridade estrutural dos seus componentes em serviço, permitindo fazer uma otimização da vida útil destes, evitar falhas catastróficas, garantir a segurança dos utilizadores, melhorar a fiabilidade das próprias estruturas, reduzindo assim custos inerentes a possíveis paragens por falha de um dos seus componentes (“tempos “mortos”).

A Figura 2.2 faz alusão ao naufrágio do navio petroleiro *Prestige*, que ocorreu a 13 de novembro de 2002, na Galiza, responsável por desencadear uma das maiores catástrofes ecológicas

européias. Este desastre teve como possível causa a acumulação de danos estruturais no casco, que não foram detetados previamente.



Figura 2.2 - Naufrágio do navio *Prestige*

O avanço tecnológico que se fez sentir nas últimas décadas, ao nível dos sensores tecnológicos, algoritmos computacionais, entre outros, permitiu o aparecimento de várias tecnologias que têm como objetivo comum detetar danos. Surgem os métodos de ensaios não destrutivos que apresentam como principal característica o facto de não danificarem o material para fazer a identificação do dano. Dentro deste grupo destacam-se os métodos convencionais, “Ensaio Não Destrutivo (END)”, e os métodos de Identificação de Dano Baseados em Vibrações (IDBV).

Os END são métodos que dependem de medições diretas, por forma a determinar a condição física de uma estrutura e avaliar a sua fiabilidade. São técnicas localizadas, onde é necessário saber, *a priori*, qual a vizinhança do dano, de modo a inspecionar essa zona, obrigando a que esta seja de fácil acesso, de forma a levar o equipamento até à mesma. São métodos dispendiosos, que necessitam de longos períodos de inspeção, não permitindo uma monitorização contínua da estrutura. Podem existir falhas na inspeção porque, por vezes, a acessibilidade ao local a inspecionar é difícil e/ou a extensão do dano ultrapassa o intervalo de inspeção permitido pelos END [5].

Dentro dos END, destacam-se as correntes induzidas, raio X, ultrassons, termografia, radiografia, líquidos penetrantes, partículas magnéticas e inspeção visual [2], como representado na Figura 2.3.

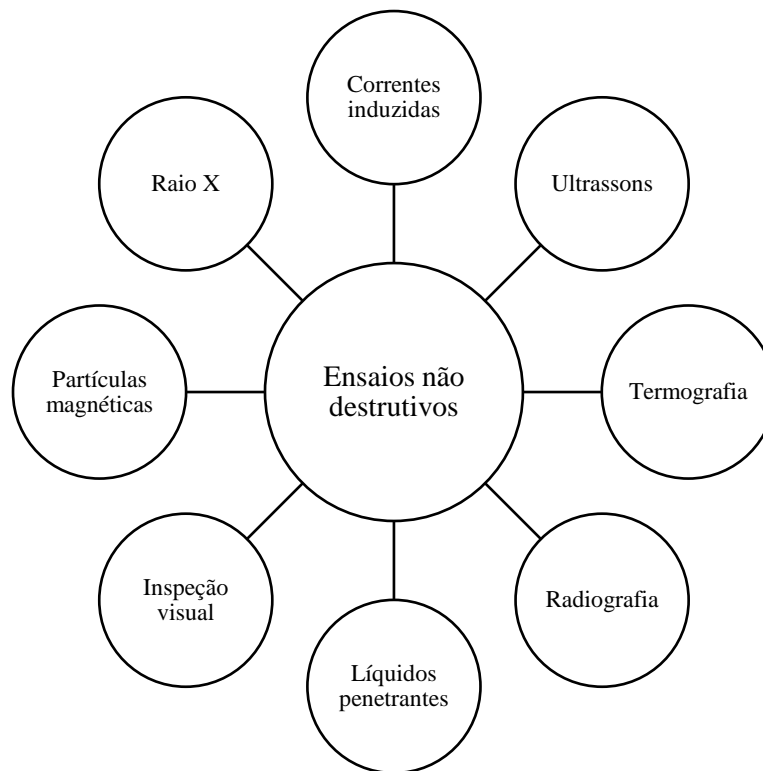


Figura 2.3 – Técnicas convencionais dos Ensaios Não Destrutivos

Perante as limitações dos END mencionadas anteriormente, surge a necessidade de existirem métodos mais globais capazes de detetar dano em estruturas de grandes dimensões, com elevado grau de complexidade, sem necessidade de saber *a priori* qual a possível localização do dano.

Para colmatar esta necessidade, surgiram os métodos de Identificação de Dano Baseados em Vibrações. Estes métodos baseiam-se nas medições periódicas das propriedades dinâmicas da estrutura, podendo esta estar em serviço ou não. A qualidade da informação adquirida proveniente dos ensaios de vibração é crucial no sucesso da identificação de dano. Os IDBV dependem, essencialmente, da sensibilidade dos sensores utilizados, da precisão dos parâmetros modais para os modelos de teste e da fiabilidade do algoritmo considerado na manipulação dos dados [1].

A eficácia dos IDBV tem sido um problema importante na comunidade científica, tendo o seu desenvolvimento sido crescente na última década, levando à elaboração de novos critérios baseados nas alterações das medições das propriedades dinâmicas de uma estrutura. Estas podem ser frequências naturais, modos de vibração, amortecimento modal e FRFs, sendo estas funções das propriedades físicas da estrutura, nomeadamente rigidez, massa e amortecimento [6].

A presença de dano causa uma alteração nas propriedades físicas da estrutura e, por sua vez, nas propriedades dinâmicas da mesma, como referido acima. É com base nestas alterações que é possível averiguar a integridade da estrutura, localizar o dano e perceber a sua extensão.

Dentro dos IDBV, destaca-se o uso das frequências naturais, dos modos de vibração, das Funções de Resposta em Frequência, das Transmissibilidades ou, ainda, da matriz de Flexibilidade, sendo estas as propriedades dinâmicas da estrutura mais utilizadas na implementação dos algoritmos de identificação do dano [6].

2.2 Categorização e classificação de métodos de deteção de dano que utilizam vibrações mecânicas

Na década de 70, surgem os primeiros estudos para determinar a fiabilidade dos métodos que utilizam as vibrações mecânicas para detetar dano. No entanto, ainda não existia nenhum “padrão” de resultados que permitisse comparar as informações fornecidas por cada um dos diferentes métodos.

Em 1990, Rytter [7] sugere que a caracterização do dano compreende quatro níveis, sendo estes:

- Nível 1: **Deteção** – constatar a presença de dano na estrutura;
- Nível 2: **Localização** – fornecer a localização provável do dano;
- Nível 3: **Quantificação** – indicar a severidade do dano na estrutura;
- Nível 4: **Previsão** – estimar o tempo útil de vida da estrutura para um dado dano.

Em 2005, Park [8] divide os métodos que utilizam vibrações mecânicas em dois grandes grupos:

- Métodos de Referência – este tipo de métodos necessita de um modelo numérico teórico fiável prévio, de forma a poder detetar dano com sucesso. É de notar que

a construção de um modelo numérico fiável está inerente a um elevado grau de dificuldade;

- Métodos Experimentais – não necessitam de qualquer modelo numérico, sendo apenas necessária a existência de dados experimentais. Contudo, a aquisição destes dados tem algumas fragilidades associadas, nomeadamente, a presença de ruído, o facto de estarem dependentes da experiência da pessoa que adquire os dados e o elevado custo dos equipamentos.

Finalmente, temos ainda a divisão com base no “input” que cada técnica utiliza [9]:

- Métodos Tradicionais – baseiam-se na alteração das características dinâmicas de um sistema com e sem dano (como por exemplo: frequências naturais, modos de vibração e Funções de Resposta em Frequência);
- Métodos Modernos – também chamados de Métodos de Diagnóstico de Dano Inteligentes, utilizam ferramentas de tratamento de sinal avançadas ou inteligência artificial.

2.3 Conceitos teóricos dos métodos tradicionais

Como referido anteriormente, os métodos tradicionais têm por base a alteração das características dinâmicas da estrutura, provocada pela existência de dano.

2.3.1 Frequências naturais

No subcapítulo 2.1 foi mencionado que a presença de dano irá modificar os valores das frequências naturais da estrutura, o que pode ser facilmente compreendido se se olhar para a equação seguinte (2.1). Uma alteração da rigidez ou da massa da estrutura irá produzir efeitos nas frequências naturais da mesma.

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2.1)$$

Onde ω diz respeito à frequência natural, K à rigidez e M à massa da estrutura.

Doebbling *et al.* [10] afirma que o artigo pioneiro na investigação sobre a detecção de dano, com base na comparação de frequências naturais de uma dada estrutura, com e sem dano, foi apresentado em 1969 por Lifshitz e Rotem [11]. Neste artigo, verificou-se que era possível detetar dano, utilizando as alterações entre o módulo dinâmico (razão da tensão/extensão em condições vibratórias, forças oscilatórias impostas). De referir que os autores, calcularam o módulo dinâmico a partir do valor das frequências naturais, usando a relação elástica simples, para o caso de um sistema com um grau de liberdade. Neste estudo foram utilizados elastómeros preenchidos com partículas.

Segundo Safara [12] e Salawu [13], as técnicas que têm por base as alterações nas frequências naturais revelam-se incapazes de, simultaneamente, detetar e localizar o dano. Por um lado, as propriedades modais da estrutura apresentam uma grande dependência de fatores externos, como o efeito das condições ambientais ou o ruído. Por outro lado, devido ao facto de as frequências naturais serem propriedades globais, a presença de um dano muito reduzido pode não ter um impacto suficiente para causar uma alteração nas mesmas. Finalmente, para a mesma alteração das frequências naturais, pode não ser possível perceber se esta pode ter sido causada por um ou mais danos.

Sinou [14] sugere a utilização de um critério de Normalização das Frequências Naturais (NFN) para a detecção de dano. Este critério é definido pelo rácio entre a i -énésima frequência natural danificada e não danificada, como mostra a equação 2.2.

$$NFN_i = \frac{\omega_i^{danificada}}{\omega_i^{intacta}} \quad (2.2)$$

Sinou [14] considerou ainda o erro percentual ($\%C_i$) entre a i -énésima frequência natural danificada e não danificada, representado na equação 2.3.

$$\%C_i = 100 \times \frac{\omega_i^{intacta} - \omega_i^{danificada}}{\omega_i^{intacta}} \quad (2.3)$$

Por fim, Messina *et al.* [15] sugere dois métodos relativamente idênticos com base nas alterações das frequências naturais, sendo que, enquanto o primeiro considera apenas a presença de um único dano na estrutura, o segundo considera a situação de múltiplos danos presentes.

- *Damage Location Assurance Criterion (DLAC)*

$$DLAC_i = \frac{|(\Delta\omega_A)^T \cdot \Delta\omega_B(i)|^2}{((\Delta\omega_A)^T \cdot \Delta\omega_A) \cdot ((\Delta\omega_B(i))^T \cdot \Delta\omega_B(i))} \quad (2.4)$$

onde $\Delta\omega_A$ representa o vetor das variações das frequências naturais medidas para o único dano, de extensão e localização desconhecida, $\Delta\omega_B$ representa o vetor teórico com as variações das frequências naturais quando se conhece a extensão do dano e este se localiza na posição j .

- *Multi Damage Location Assurance Criterion (MDLAC)*

$$MDLAC_i = \frac{|(\Delta\omega_A)^T \cdot S\delta x_i|^2}{((\Delta\omega_A)^T \cdot \Delta\omega_A) \cdot ((S\delta x_i)^T \cdot S\delta x_i)} \quad (2.5)$$

onde S define a matriz de sensibilidades, expressa na equação 2.6, contendo as derivadas de primeira ordem das n frequências naturais em relação às m variáveis de dano x . Com o uso deste método, o dano é encontrado, a partir do vetor δx_i que maximiza MDLAC (com o valor de 1).

$$S = \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \omega_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \omega_1}{\partial x_m} \\ \frac{\partial \omega_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \omega_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \omega_2}{\partial x_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \omega_n}{\partial x_1} & \frac{\partial \omega_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \omega_n}{\partial x_m} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.3.2 Modos de vibração

Em alternativa à utilização das variações das frequências naturais, vários autores investigaram a utilização dos modos de vibração de modo a avaliar a fiabilidade destes em métodos de deteção de dano. Estes são uma característica espacial que uma estrutura adquire quando vibra a uma das suas frequências naturais. Como referido no subcapítulo anterior, a presença de dano conduz, geralmente, a alterações na rigidez de uma estrutura e, consequentemente, a alterações nas frequências naturais e nos modos de vibração.

No entanto, o uso deste tipo de técnicas acarreta algumas desvantagens, sendo a maior delas a necessidade de utilizar um grande número de pontos de medição, com o objetivo de recriar os modos de vibração de forma precisa. Devido ao facto de os modos de vibração estarem diretamente ligados às frequências naturais, é necessário realizar uma identificação modal da estrutura de forma a obter os modos de vibração da mesma [9], sendo o processo de identificação modal algo bastante complicado de realizar.

Os critérios com base nos modos de vibração estão divididos em dois grandes grupos, dependendo do foco de cada um. Existindo critérios com base nas alterações dos modos de vibração e/ou com base nas curvaturas dos mesmos.

Nas metodologias que têm por base a alteração nos modos de vibração destacam-se o [9]:

- *Modal Assurance Criterion* (MAC) – este método baseia-se no nível de correlação entre os modos de vibração de uma estrutura intacta e posteriormente danificada; varia entre 0 e 1, apresentando 1 quando não existe dano. Revelou-se um bom indicador na deteção de dano, apresentando, contudo, algumas dificuldades quanto à localização do mesmo [10].

$$MAC(\phi_i, \phi_j) = \frac{\left| \sum_{k=1}^n (\phi_j)_k (\phi_i)_k^* \right|^2}{\left(\sum_{k=1}^n (\phi_j)_k (\phi_j)_k^* \right) \left(\sum_{k=1}^n (\phi_i)_k (\phi_i)_k^* \right)} \quad (2.7)$$

onde ϕ_i e ϕ_j representam os modos de vibração referentes à estrutura intacta e danificada, respetivamente, * o complexo conjugado e k o elemento do vetor do modo de vibração e n o número de modos estudados.

- *Co-ordinate Modal Assurance Criterion (COMAC)* – este tem por base o critério MAC, tendo a vantagem de poder identificar uma coordenada, de entre dois modos de vibração, que não coincide; no entanto, ainda não permite identificar a localização de dano [16].

$$COMAC(i) = \frac{\left(\sum_{j=1}^n |(\phi_A)_{ij} (\phi_B^*)_{ij}| \right)^2}{\sum_{j=1}^n |(\phi_A)_{ij}|^2 \sum_{j=1}^n |(\phi_B)_{ij}|^2} \quad (2.8)$$

onde n representa o número de modos de vibração que se pretende correlacionar e $(\phi_A)_{ij}$ e $(\phi_B)_{ij}$ o valor do modo de vibração j no ponto i para o estado com dano (A) e sem dano (B).

- *Absolute Difference Strain ModeShape (ASDM)* – como o nome indica, tem por base a diferença absoluta de um modo de vibração de uma estrutura com e sem dano. A localização é feita para cada modo de vibração, sendo que a variação nos mesmos indica a correlação que existe entre os dois modos. O aumento do indicador ASDM indica uma diminuição da correlação entre os dois modos e, por conseguinte, a presença de dano. Comparativamente ao COMAC, este consegue identificar a localização do dano para cada modo de vibração. Quando é utilizado um número reduzido de modos, a localização do dano fica comprometida, verificando-se melhores resultados quando o número de modos utilizados é incrementado [17].

$$ASDM = |\Psi_I - \Psi_D| \quad (2.9)$$

onde Ψ_I e Ψ_D representam o modo com e sem dano, respetivamente.

- *New Method* – a diferença deste método em relação ao anterior reside no facto de ser feito o módulo da diferença do valor absoluto dos vetores modais, e não a diferença absoluta dos vetores modais. A utilização dos módulos em cada modo de vibração permite maximizar o número de identificações de dano em cada modo [17].

$$New\ method = ||\Psi_I| - |\Psi_D|| \quad (2.10)$$

É de notar que nos critérios MAC e COMAC, os modos de vibração foram obtidos através da utilização de acelerómetros, enquanto que nos critérios ASDM e New Method os modos de vibração foram determinados através da utilização de extensómetros.

Finalmente, têm-se os critérios que têm por base a análise das curvaturas dos modos de vibração, obtidas através da aplicação da segunda derivada a cada modo de vibração, por aproximação através do método das diferenças finitas. A aplicação deste tipo de critérios, segundo os seus autores [18], baseia-se no facto da segunda derivada do modo de vibração ser muito mais sensível a pequenas perturbações quando comparada ao próprio modo, permitindo assim uma deteção mais fiável.

Através das curvaturas dos modos, podem aplicar-se diferentes critérios, destacando-se a diferença absoluta entre a curvatura do modo com e sem dano [19], o critério *Mode Shape Curvature Square* (MSCS) [20], que não é mais que a diferença absoluta dos quadrados de cada curva, e, por fim, o Método *Damage Index* (DI) [21], com uma complexidade superior aos outros dois mencionados.

2.3.3 Funções de resposta em frequência

Fundamentos Teóricos

A equação que traduz o equilíbrio dinâmico de um sistema complexo, composto por n graus de liberdade (GDL), considerando a existência de amortecimento viscoso, é dada por:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} = \{f(t)\} \quad (2.11)$$

onde $[M]$, $[K]$ e $[C]$ correspondem, respetivamente, às matrizes de massa, rigidez e amortecimento, $\{x(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$ e $\{\ddot{x}(t)\}$ representam os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração para o instante t de tempo e finalmente $\{f(t)\}$ traduz o vetor de forças exteriores aplicadas ao sistema.

Quando associado a uma excitação do tipo harmónica, o vetor de forças pode ser traduzido pela seguinte equação:

$$\{f(t)\} = Fe^{i\omega t} \quad (2.12)$$

Logo, a resposta do sistema será também do tipo harmônica e, em regime estacionário, no domínio da frequência, ω , é definida por:

$$\{x(t)\} = \bar{X}e^{i\omega t} \quad (2.13)$$

onde X é um número complexo, definido por $\bar{X} = Xe^{i\theta}$.

Substituindo as equações 2.12 e 2.13 na equação do equilíbrio dinâmico (2.11), podemos obter a equação que traduz a relação entre a resposta e a excitação do sistema para cada frequência:

$$(-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])\{\bar{X}(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (2.14)$$

Finalmente, pode-se reescrever a relação entre a resposta \bar{X} e a excitação F no domínio da frequência através de:

$$\{\bar{X}(\omega)\} = ([K] - \omega^2[M] + i\omega[C])^{-1} \cdot \{F(\omega)\} \quad (2.15)$$

onde a matriz de rigidez dinâmica é dada por $Z(\omega) = [K] - \omega^2[M] + i\omega[C]$. Sendo a matriz de Recetâncias $H(\omega)$ igual ao inverso da matriz de Rigidez Dinâmica $Z(\omega)^{-1}$, pode-se reescrever a equação 2.11 da seguinte forma:

$$[H(\omega)]\{F(\omega)\} = \{\bar{X}(\omega)\} \quad (2.16)$$

A matriz de Recetâncias contém a informação referente às características dinâmicas do sistema. Cada elemento da matriz $H_{i,j}(\omega)$ corresponde à resposta de uma coordenada de medição i devida a uma força/momento aplicado na coordenada j , para uma dada frequência ω , como representado na equação 2.17. Se $H_{i,j}$ for obtida para uma dada gama de frequências chamamos-lhe Função de Resposta em Frequência.

$$H_{i,j}(\omega) = \frac{\bar{X}_i(\omega)}{F_j(\omega)} \quad (2.17)$$

Segundo Maia *et al.* [22], uma Recetância é representada através de um número complexo e permite descrever a relação entre a resposta medida na coordenada de medição i , em termos de deslocamento, devida a uma força de excitação aplicada no ponto j , podendo assim caracterizar as propriedades dinâmicas do sistema.

Uma FRF é uma função complexa no domínio da frequência, caracterizada por uma parte real e uma parte imaginária. Esta pode ser definida através de várias formas: deslocamento, velocidade e aceleração, de onde advém, respetivamente, a Recetância $H(\omega)$, Mobilidade $Y(\omega)$ e Acelerância $A(\omega)$. Nas equações 2.18, 2.19 e 2.20 estão representadas as equações que descrevem cada uma das formas de definir uma FRF, atrás referidas.

$$H(\omega) = \frac{\text{resposta de deslocamento}}{\text{força de excitação}} = \text{Recetância} \quad (2.18)$$

$$Y(\omega) = \frac{\text{resposta de velocidade}}{\text{força de excitação}} = i\omega \times H(\omega) = \text{Mobilidade} \quad (2.19)$$

$$A(\omega) = \frac{\text{resposta de aceleração}}{\text{força de excitação}} = -\omega^2 \times H(\omega) = \text{Acelerância} \quad (2.20)$$

Na Figura 2.4 é apresentada uma comparação entre as representações gráficas da parte real e imaginária para cada forma de FRF.

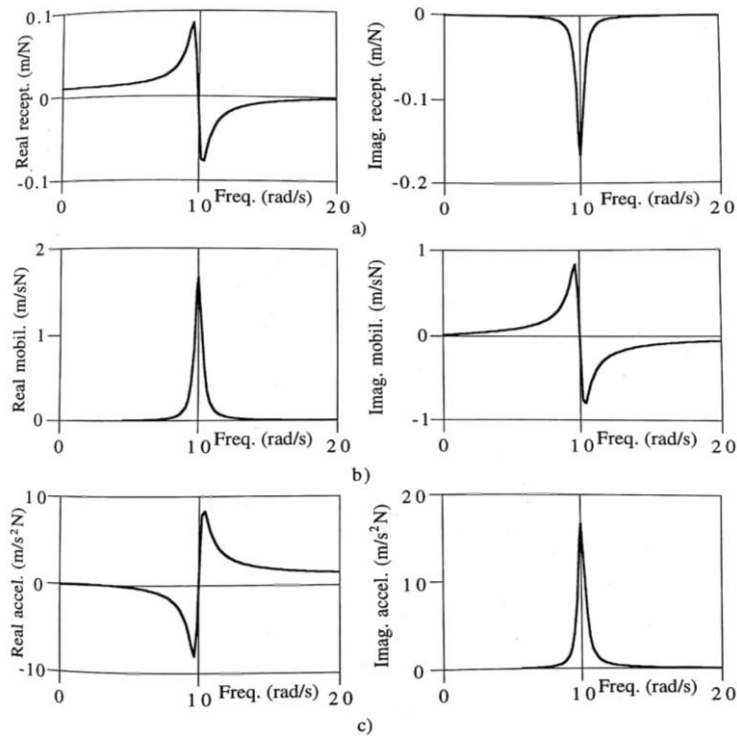


Figura 2.4 - Comparação dos gráficos da parte real e imaginária para uma FRF do tipo recetância (a), mobilidade (b) e acelerância (c) de um sistema SDOF [22]

Devido ao amplo uso de acelerómetros para medir as respostas das estruturas, as FRFS são geralmente medidas em termos de Acelerância.

Ao contrário do que acontece com os modos naturais de vibração, que apenas representam o comportamento de uma estrutura para cada uma das suas frequências naturais, as FRFs permitem descrever o comportamento funcional da estrutura a qualquer frequência de excitação pretendida ω , o que é chamado de Modo Operacional de Vibração (MOV). Os MOV podem ser representados através de cada vetor coluna da matriz de Recetâncias ($H_j(\omega)$) quando a estrutura é sujeita a uma força unitária.

Deteção de dano utilizando as FRFs

Outra abordagem para a deteção do dano reside na utilização direta das Funções de Resposta em Frequência. Wang [23] *et al.* refere as vantagens do uso das FRFs, quando comparadas com a utilização das frequências naturais e dos modos de vibração, sendo a maior delas o facto de não ser necessária a realização de uma identificação modal da estrutura. As FRFs podem ser obtidas para uma gama de frequências desejada, contendo, assim, toda a informação referente a essa gama estudada. Quando são utilizados os modos de vibração, apenas temos a informação do modo associado à frequência natural. Contudo, as FRFs são bastante sensíveis a fatores externos (por exemplo, a ação do vento numa estrutura) ou à adição de ruído.

No seu trabalho, Wang *et al.* [23] formulou um novo algoritmo de deteção de dano, de modo a utilizar um modelo analítico original e dados de FRFs medidos antes e após a introdução de dano. O algoritmo implementado foi baseado em equações de perturbação não lineares a partir das FRFs, tendo como objetivo obter um vetor de dano que indicasse a localização e a magnitude do dano.

Araújo dos Santos *et al.* [24] verificaram que a gama de frequências estudada e o ponto de aplicação onde a estrutura é excitada são fatores determinantes na deteção de dano. Estes sugerem um método de identificação de dano baseado na sensibilidade das FRFs, tendo este sido aplicado a uma estrutura laminada.

Park *et al.* [8] propõe que a análise do dano seja feita em várias subestruturas que compõem a estrutura original, em oposição a uma única análise de dano aplicada à estrutura completa. Esta metodologia tem como objetivo reduzir o volume de experimentação.

Já Lee e Shin [25] desenvolveram um método de deteção de dano baseado em FRFs medidas experimentalmente. Estes reduziram o domínio do problema, excluindo as zonas intactas da estrutura da análise, de modo a ficarem apenas com as zonas suspeitas de dano. O dano foi considerado como uma alteração no módulo de elasticidade do material constituinte da estrutura. Os autores referem como vantagem o facto de utilizarem os modos de vibração da estrutura sem dano, com as FRFs da estrutura danificada. Todavia, concluiu-se que este método só permitia a deteção de dano se a presença de ruído não ultrapassasse os 9%.

Como foi referido anteriormente, as FRFs podem apresentar grande fragilidade perante fatores externos. Limongelli [26] tentou verificar a influência da temperatura e do ruído numa ponte. Para tal, desenvolveu o método denominado Interpolation Damage Detection Method (IDDM), onde a identificação do dano é feita através da diferença entre o deslocamento medido num ponto e o deslocamento calculado por meio de uma função de interpolação para a mesma localização. Esta identificação é gerada com base na leitura dos deslocamentos medidos pelos sensores, previamente colocados em diversos locais. Limongelli verificou que, para níveis baixos de ruído, a temperatura não afeta os resultados para o método proposto.

Bovio *et al.* [27] propõem o uso de dois indicadores semelhantes, onde se avalia as variações das FRFs de um sistema com dano, por forma a obter as dimensões do mesmo.

$$Index_1 = \frac{\sum_{i=1}^n |FI_i - FD_i|}{\sum_{i=1}^n FI_i} \quad (2.21)$$

$$Index_2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{|FI_i - FD_i|}{FI_i} \right) / n \quad (2.22)$$

onde FI_i e FD_i correspondem, respetivamente, à amplitude das FRFs da estrutura intacta e danificada, à i -énima frequência e n corresponde ao número de frequências que utilizaram.

O primeiro índice corresponde à razão entre o valor absoluto da média aritmética do desvio entre as FRFs da estrutura sem e com dano, com a média aritmética das FRFs da estrutura sem dano. O segundo indicador corresponde à razão entre o valor absoluto do desvio das FRFs sem dano e com dano, e a FRF sem dano.

Acima foram descritos alguns dos indicadores usados para detetar dano com base em FRFs, embora existam ainda muitos outros não mencionados. De realçar os indicadores *Frequency Domain Assurance Criterion* (FDAC), *Response Vector Assurance Criterion* (RVAC) e *Frequency Response Assurance Criterion* (FRAC), que consistem em indicadores desenvolvidos no domínio da frequência, por forma a correlacionar duas curvas [28].

O conceito de curvatura aplicado às FRFs ($H_{i,j}$) surge com Maia *et al.* [29] e é expresso pela seguinte equação:

$$H''_{i,j}(\omega) = \frac{H_{i+1,j}(\omega) - 2H_{i,j}(\omega) + H_{i-1,j}(\omega)}{h^2} \quad (2.23)$$

onde h corresponde à distância entre pontos de medição e H'' corresponde à segunda derivada de $H_{i,j}$, obtida por aproximação através do método das diferenças finitas.

Associado ao conceito de curvatura, Maia *et al.* [30] sugerem diferentes indicadores por forma a detetar o dano. Primeiramente, sugerem a diferença absoluta entre as curvaturas das FRFs medidas entre a estrutura sã e com dano, para cada frequência ω :

$$\Delta H''_{i,j}(\omega) = |H''^d_{i,j}(\omega) - H''_{i,j}(\omega)| \quad (2.24)$$

De modo a localizar o dano, para cada ponto de medição i , efetua-se o somatório de todos os valores dos indicadores para cada frequência e para todas as forças aplicadas (j). Este critério é denominado por *FRF based Mode Shaped Curvature* (FRF_MSC):

$$FRF_MSC_i = \sum_w \sum_j \Delta H''_{i,j}(\omega) \quad (2.25)$$

Maia *et al.* [30] sugerem ainda a variação absoluta entre os quadrados das curvaturas, *FRF based Mode Shaped Curvature Square* (FRF_MSCS), de modo a detetar danos de tamanho reduzido (equação 2.22). Estes indicadores são similares aos aplicados para os modos de vibração.

$$\Delta \left(H''_{i,j}(\omega) \right)^2 = \left| \left(H''^d_{i,j}(\omega) \right)^2 - \left(H''_{i,j}(\omega) \right)^2 \right| \quad (2.26)$$

Efetuando o somatório para cada frequência e força, obtém-se:

$$FRF_MSCS_i = \sum_w \sum_j \Delta \left(H''_{i,j}(\omega) \right)^2 \quad (2.27)$$

No entanto, o uso das curvaturas impede a detecção de dano nas extremidades de uma viga, pois analisando a equação 2.23 verifica-se que, para calcular a curvatura de um ponto, é necessário conhecer o valor da FRF do ponto anterior e posterior, facto que não se consegue nos primeiro e último ponto da viga.

Por fim, Liu [31] sugere apenas o uso da parte imaginária da FRF de Recetância para localizar o dano em estruturas, sendo proposto o critério de Residual Imag FRF Shapes. Neste, o autor apenas calcula a diferença máxima entre a parte imaginária de uma FRF com dano e sem dano a cada frequência, numa gama de frequências em estudo, para uma dada força aplicada.

$$\Delta \text{imag}_{-FRF_{ij}}(\omega, u_{norm}) = \text{imag}_{-FRF_{ij}}(\omega, u_{norm}) - \text{imag}_{-FRF_{ij}^{dano}}(\omega, u_{norm}) \quad (2.28)$$

onde u_{norm} representa a normalização à unidade.

2.3.4 Transmissibilidade

Fundamentos Teóricos

O conceito de transmissibilidade associado a um sistema com um grau de liberdade, quando a sua base se move com movimento harmónico, é definido pela razão entre a amplitude da resposta medida e a amplitude do movimento imposto à base.

Ewins and Liu [32] e Varoto and McConnell [33] estenderam o conceito inicial de transmissibilidade associado a um grau de liberdade para sistemas com N graus de liberdade.

Em 1998, Ribeiro [34] apresenta uma nova dedução de transmissibilidade para sistemas com múltiplos graus de liberdade, para tal considera que são aplicadas forças harmónicas ao sistema e estabelece as relações entre as respostas e as forças aplicadas em termos de Recetâncias. Considerando que temos um vetor de forças F_A com os valores das magnitudes das forças aplicadas nas coordenadas A , um vetor X_U com as amplitudes da resposta nas coordenadas consideradas desconhecidas U e um vetor X_K com as amplitudes da resposta nas coordenadas consideradas como conhecidas K (Figura 2.5), é possível estabelecer as relações expressas pelas equações 2.29 e 2.30.

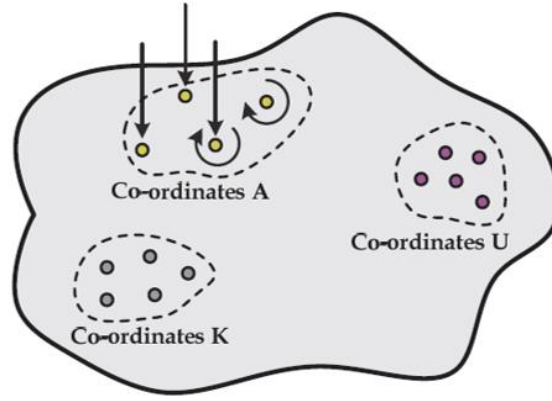


Figura 2.5 - Sistema com a representação das coordenadas A, U e K [34]

$$X_U = H_{UA}F_A \quad (2.29)$$

$$X_K = H_{KA}F_A \quad (2.30)$$

onde H_{UA} e H_{KA} representam as matrizes de recetância que relacionam as coordenadas U e A , e K e A , respetivamente. Resolvendo as equações 2.29 e 2.30 em ordem a F_A e eliminando esta componente, obtém-se a equação 2.31:

$$X_U = H_{UA}(H_{KA})^+X_K = T_{UK}^{(A)}X_K \quad (2.31)$$

onde $(H_{KA})^+$ representa a pseudo-inversa da matriz H_{KA} e $T_{UK}^{(A)}$ a Matriz de Transmissibilidades que relaciona as coordenadas U e K , considerando a força aplicada em A . De notar que para ser possível efetuar a pseudo-inversa, o número de coordenadas K tem de ser igual ou superior ao número de coordenadas A . A Matriz de Transmissibilidades possui uma importante propriedade que reside no facto de esta não depender da magnitude das forças aplicadas, sendo apenas necessário conhecer as coordenadas onde estas são aplicadas. Estas Transmissibilidades são muitas vezes definidas como “Transmissibilidades Globais” [35].

Mais recentemente, Devriendt e Guillaume [36] apresentaram uma nova definição de Transmissibilidade sendo esta simplesmente definida como a razão entre duas respostas medidas, devidas a uma força aplicada, estas Transmissibilidades são também por vezes chamadas de “Transmissibilidades Locais”.

Maia *et al.* [37] reformula o critério RVAC de forma a poder aplicá-lo às Transmissibilidades. É com base neste critério que Maia *et al* [37] e Almeida *et al* [38] sugerem vários critérios de forma a detetar e quantificar o dano.

Na metodologia desenvolvida considerando a utilização das transmissibilidades é de destacar o critério *Transmissibility Damage Indicator* (TDI), proposto por Maia *et al* [35], que se baseia na correlação entre transmissibilidades de pares de coordenadas sucessivas, para uma gama N de frequência em estudo. Este método revelou sucesso na deteção e quantificação relativa de dano, apesar de apresentar limitações para baixos níveis de dano. No seguimento deste trabalho, Almeida *et al.* [38] propuseram o *Weighted Damage Indicator* (WDI), que tem como objetivo superar esta limitação.

2.4 Métodos “inteligentes” de deteção de dano

Perante o facto de nenhum dos métodos tradicionais satisfazer os quatro níveis de deteção propostos por Rytter [7], vários investigadores tentaram desenvolver novas metodologias que utilizassem sistemas de tratamento de sinal avançadas ou inteligências artificiais. Dentro destes métodos podem realçar-se as técnicas que fazem uso das redes neuronais artificiais, algoritmos genéticos, *Wavelet Analysis*. No entanto, a aplicação deste tipo de métodos acarreta um custo computacional muito mais elevado em comparação com os métodos tradicionais.

Redes neuronais artificiais

Segundo Bandara [3] e Morais [9], as redes neuronais artificiais (RNA) são algoritmos avançados que apresentam um excelente padrão de reconhecimento e análise da estrutura, com elevada habilidade de mapeamento. Possuem ainda uma aprendizagem, organização e associação autónomas, permitindo o mapeamento de uma estrutura.

A sua grande vantagem advém do facto de conseguirem extrair informações precisas e fiáveis a partir de dados inconsistentes e “poluídos” por ruído. A partir do momento em que se “treinam” as RNAs, fornecendo dados experimentais já verificados, estas estão aptas a funcionar, sendo apenas necessário introduzir novos dados experimentais. Devido ao processo de aprendizagem que sofrem no início, têm a capacidade de diagnosticar automaticamente quaisquer falhas/danos que possam ocorrer.

Wavelet Analysis

Wavelet Analysis é uma ferramenta de processamento de sinal estacionária, que permite a detecção de sinal singular e a separação do ruído do sinal obtido em experimentação. Esta ferramenta é frequentemente usada de forma a melhorar os indicadores de dano [9].

Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos permitem descobrir a localização do dano em diversas situações, sendo independentes dos detalhes da estrutura em estudo. Possuem ainda uma elevada eficiência a nível de cálculo de danos, conseguindo em simultâneo reduzir os tempos de computação para a detecção de dano em estruturas complexas [9].

3 Nova metodologia aplicada a um modelo numérico

No trabalho em questão, foi desenvolvida uma metodologia com objetivo de detetar, localizar e quantificar relativamente o dano imposto a uma viga, que de um modo sucinto, pode ser descrita em duas fases:

- Numa primeira fase, foi feita a modelação de uma viga livre-livre, com base no método dos elementos finitos, utilizando o software de programação *Matlab*, que teve como objetivo a obtenção das respostas dinâmicas de translação e rotação para todos os pontos de medição/excitação da mesma. Este estudo foi feito para a situação da viga com e sem dano. Posteriormente foram aplicados diferentes indicadores a estes resultados, por forma a fazerem a correlação entre os dados com e sem dano.
- A segunda fase consistiu na análise e tratamento dos dados/resultados, com o auxílio do software *Microsoft Excel*, nesta fase que foram analisados diferentes casos de estudo, efetuando a deteção, localização e quantificação relativa do dano.

Neste capítulo estão descritos os fundamentos/procedimentos relativos à primeira fase. De realçar que, com a aplicação desta metodologia, teve-se como ambição conseguir detetar, localizar e quantificar de uma forma relativa o dano. Adicionalmente, foram ainda descritos alguns conceitos essenciais, de que são exemplo a forma de aplicação do dano, a implementação do amortecimento, a assemblagem das matrizes de massa e rigidez, entre outros.

3.1 Aplicação do método dos elementos finitos

O MEF é um método geral e poderoso muito usado na resolução de problemas concretos de engenharia que podem envolver geometrias, comportamentos físicos e condições fronteira complexas. No MEF, o domínio é decomposto em vários subdomínios mais simples, onde as equações que regem o fenómeno em causa são aproximadas através de métodos variacionais tradicionais. A razão principal para aproximar uma solução num conjunto de subdomínios reside no facto de ser mais fácil representar uma função complexa como um conjunto de funções

polinomiais simples, sendo que o erro associado pode ser tão pequeno quanto se queira, pois à medida que se aumenta o número de subdomínios, obtém-se uma solução mais aproximada.

Dito isto, é possível modelar numericamente qualquer estrutura, independentemente da sua complexidade, através da sua decomposição em domínios geométricos mais simples, chamados de elementos finitos (EF), como representado na Figura 3.1. Cada um destes elementos é visto como um domínio independente, sendo posteriormente desenvolvidas equações algébricas a aplicar a cada um dos elementos. Finalmente os elementos são postos na sua ordem original ao longo do domínio global da estrutura, utilizando certas relações inter-elementos.

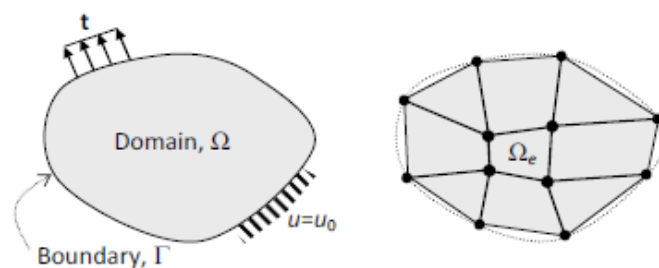


Figura 3.1 - Representação de um domínio bidimensional com condições fronteira, tração t e deslocamentos u (esquerda), com a respetiva malha EF (direita) [39]

Para o trabalho em questão, a estrutura estudada corresponde a uma viga livre-livre, devido ao facto de em termos experimentais ser a situação de apoio mais fácil de implementar. Esta tem 1000 mm de comprimento, com uma secção transversal retangular de 34,5 mm de largura e 6,5 mm de espessura, como representado na Figura 3.2. Na Tabela 3.1 são mencionadas as propriedades geométricas da estrutura.

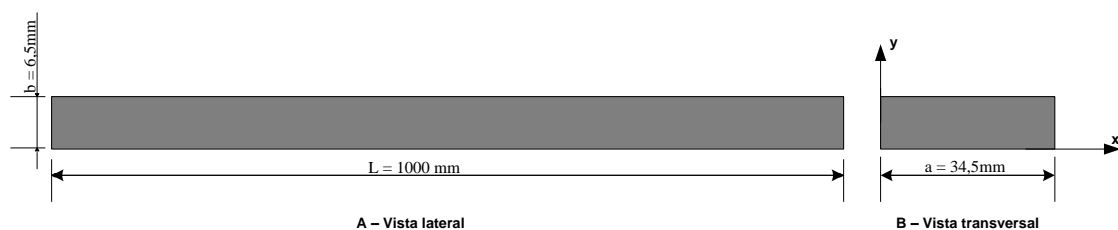


Figura 3.2 - Modelo da viga

Tabela 3.1 - Propriedades geométricas da viga

Comprimento da viga (L)	1000 mm
Largura da viga (a)	34,5 mm
Espessura (b)	6,5 mm
Área da secção transversal (A_t)	224,25 mm ²
Segundo momento de área (I_x)	$7,90 \times 10^{-10}$ mm ⁴

Quanto às propriedades do material, considerou-se um aço típico, estando as propriedades referidas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades do material constituinte da viga

Módulo de Young (E)	210 GPa
Módulo de elasticidade transversal (G)	80 GPa
Densidade (ρ)	7850 kg/m ³
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3

Para modelar a viga em causa recorreu-se à teoria de vigas de *Euler-Bernoulli* e aplicou-se o MEF, dividindo a mesma em n elementos finitos. Cada um destes elementos corresponde a um elemento de viga bidimensional.

Considerou-se que cada elemento seria um elemento bidimensional com 4 graus de liberdade (GDL), como representado na Figura 3.3, obtendo um vetor de deslocamentos (d_e), equação 3.1, onde W_1^e e W_2^e correspondem ao deslocamento vertical, θ_1^e e θ_2^e à rotação do nó 1 e 2, respetivamente.

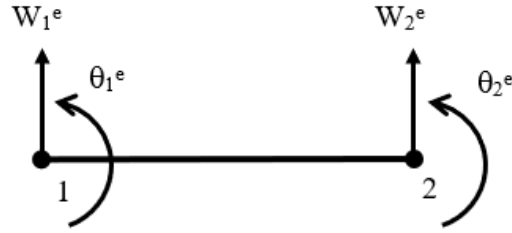


Figura 3.3 - Elemento de viga bidimensional com 4 GDL

$$d_e = \begin{bmatrix} W_1^e \\ \theta_1^e \\ W_2^e \\ \theta_2^e \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Sabendo que cada elemento da viga possui 2 nós, com 2 GDL em cada um, e aplicando a teoria de *Euler-Bernoulli*, obtém-se as Matrizes de Rigidez (K_e) e de Massa (M_e) de cada elemento (local), sendo estas matrizes quadradas com uma dimensão igual ao número de graus de liberdade do elemento, representadas nas equações 3.2 e 3.3.

$$K_e = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ -12 & 13L & 156 & -22L \\ 6L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$M_e = \frac{\rho A_t L}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Após a obtenção das matrizes locais de cada elemento, é necessário obter as matrizes de rigidez e de massa globais da viga. Para tal, prossegue-se à assemblagem das matrizes, que consiste em agrupar todas as matrizes locais de rigidez/massa, por ordem dos elementos, obtendo uma matriz única quadrada de rigidez/massa, com uma dimensão igual ao número de GDL da estrutura.

Sabendo que a estrutura é composta por n elementos, iremos ter $n+1$ nós e como cada nó tem 2 GDL, a estrutura global irá ter $2(n+1)$ GDL.

A montagem tem por base o número dos graus de liberdade de cada elemento. Sabendo que cada elemento possui dois nós, através da equação 3.4 é possível descobrir os GDL associados ao deslocamento vertical e, com a equação 3.5, os GDL associados à rotação, sendo m o número do nó cujos GDL se quer calcular.

$$GDL_{trans_{vertical}} = 2 \times m - 1 \quad (3.4)$$

$$GDL_{rotação} = 2 \times m \quad (3.5)$$

A numeração destes GDL serve como guia, por forma a fazer a colocação da matriz local do elemento na matriz global da estrutura no lugar correto.

Para o caso da viga, dois elementos seguidos partilham 1 nó, logo também partilham 2 GDL. Para este nó iremos ter uma contribuição dos deslocamentos/rotações causados pelo primeiro e pelo segundo elemento, por conseguinte, os deslocamentos/rotações neste nó irá corresponder à soma das duas componentes de cada elemento. Todo este processo de montagem está esquematizado nas equações 3.6 (para a rigidez) e 3.7 (para a massa), onde n corresponde ao número de nós do sistema.

$$[K_{global}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} \boxed{K_{e1}} & & \dots & & 0 \\ & \boxed{K_{e2}} & & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ 0 & & \dots & \boxed{K_{en-1}} & \\ & & & & \boxed{K_{en}} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$[M_{global}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} \boxed{M_{e1}} & & & & & & & \\ & \boxed{+} & & & & & & \\ & & \boxed{M_{e2}} & & & & & \\ & & & \ddots & & & & \\ & & & & \ddots & & & \\ & & & & & \ddots & & \\ & & & & & & \boxed{M_{en-1}} & \\ & & & & & & & \boxed{+} \\ & & & & & & & & \boxed{M_{en}} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.2 Propriedades modais da estrutura

Após fazer a modelação da viga e a assemblagem das matrizes locais, obtemos as matrizes globais de rigidez e massa. Posteriormente, foi resolvido um problema de valores e vetores próprios, sendo as frequências naturais obtidas pelos valores próprios e os modos de vibração correspondentes aos vetores próprios.

Na Tabela 3.3 são apresentadas as primeiras oito frequências naturais da viga associadas aos primeiros oito modos flexíveis.

Tabela 3.3 - Frequências Naturais da viga

	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª
Frequências Naturais (Hz)	34,56	95,26	186,75	308,70	461,15	644,09	857,51	1101,43

Para cada frequência natural, a estrutura apresenta um modo de flexão que pode ser visualizado segundo as coordenadas de translação (Figura 3.4) e nas coordenadas de rotação (Figura 3.5). Em ambas as figuras foram apenas apresentadas os primeiros quatro modos de vibração da estrutura.

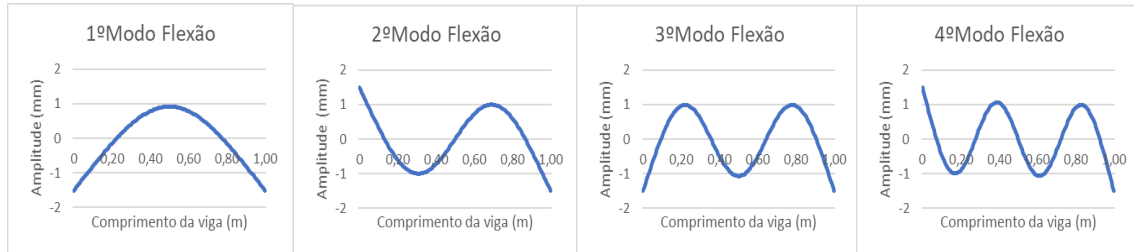


Figura 3.4 - Modos de Flexão

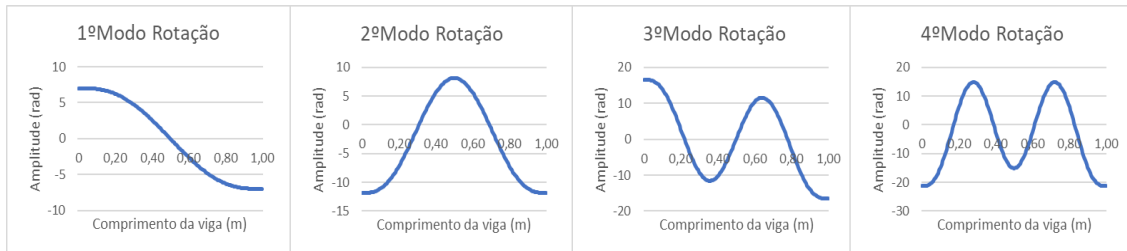


Figura 3.5 - Modos de Rotação

Comparando os modos associados à translação com os de rotação, percebe-se que o modo associado às coordenadas de rotação corresponde à derivada do modo associado às coordenadas de translação. Quando o modo de flexão atinge um máximo da curvatura, o modo de rotação apresenta uma amplitude nula para o mesmo ponto. Por outro lado, quando o modo de flexão atinge um valor nulo, o modo de rotação apresenta o valor máximo da curva. Na Figura 3.6 **Erro!** A origem da referência não foi encontrada. está representada a comparação do 3º modo de flexão com o 3º modo de rotação da viga.

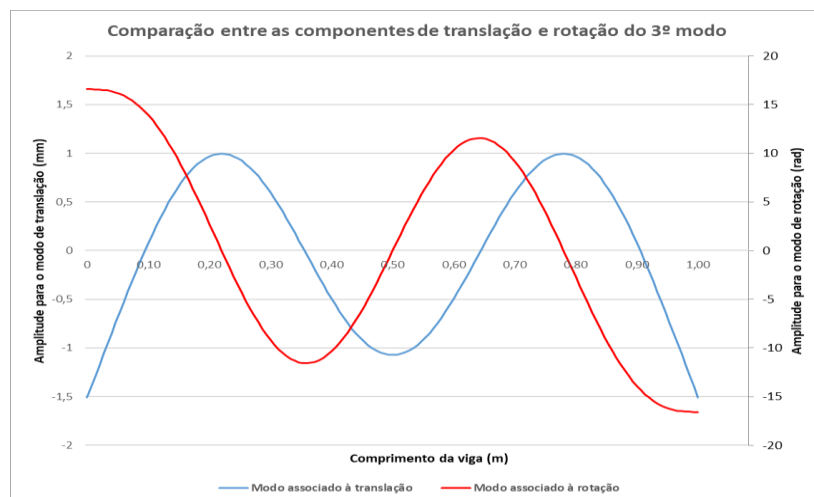


Figura 3.6 - Comparação entre o 3º modos de flexão e de rotação da viga

3.3 Implementação do amortecimento proporcional

De modo a simular o amortecimento da estrutura, foi considerado um amortecimento do tipo proporcional, onde a matriz do amortecimento é diretamente proporcional à matriz de rigidez e massa, ou linearmente proporcional quando combinadas as duas matrizes. Na equação 3.8 é demonstrada a relação entre a matriz do amortecimento e as restantes, sendo ε e ν constantes.

$$[C] = \alpha[K] + \beta[M] \quad (3.8)$$

No trabalho em questão, foi ignorada a componente relativa à matriz de massa ($\beta = 0$), considerando que a matriz de amortecimento depende apenas da matriz de rigidez. Fizeram-se vários ensaios variando a constante ε , a partir dos quais se definiu que o valor da mesma seria $\alpha = 1 \times 10^{-6}$. Na Figura 3.7 está ilustrada a resposta da estrutura sem e com amortecimento.

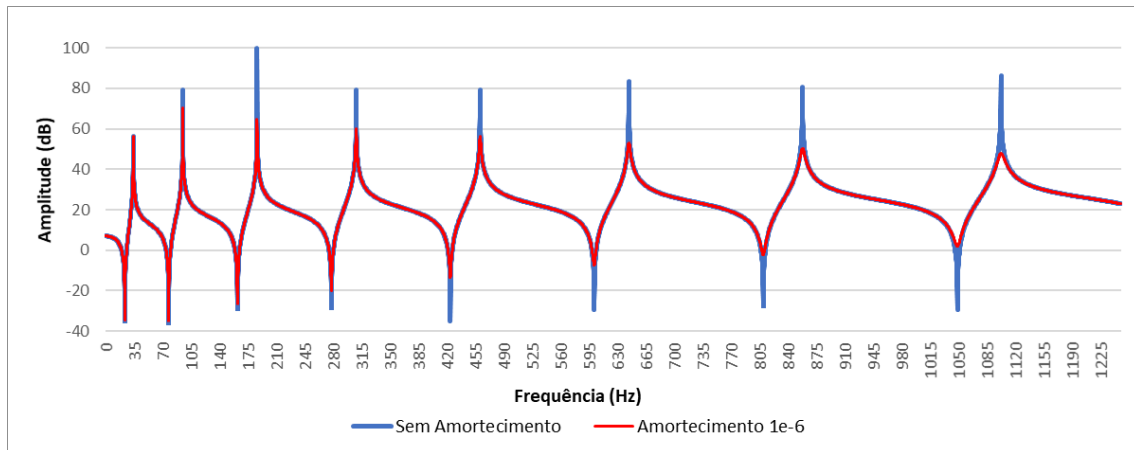


Figura 3.7 - Efeito do amortecimento

3.4 Implementação do ruído aleatório

Um dos grandes problemas inerentes às medições experimentais de uma FRF advém da presença de ruído nas FRFs medidas, prejudicando a correta detecção e localização do dano.

Como um dos objetivos deste trabalho consiste numa análise numérica, para posterior verificação experimental, de modo a permitir uma comparação entre ambas, introduziu-se uma percentagem de ruído aleatório (também denominado de ruído branco) nas FRFs.

Através de trabalhos anteriormente realizados, vários autores sugerem uma poluição dos dados numéricos na ordem dos 2-3%, sendo este um ruído do tipo aleatório. Neste estudo foi considerada uma adição de ruído aleatório numa percentagem de até 2%.

3.5 Implementação do dano

3.5.1 Modelação do elemento danificado

O dano pode variar consoante o seu tipo e a sua forma. Para o estudo em questão, foi retirada uma porção de material de um elemento sob a forma de entalhe, representado na Figura 3.8 ou seja, reduziu-se a espessura de um elemento, variando a área de seção e, por conseguinte, o seu segundo momento de área.

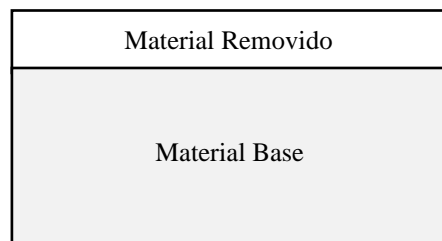


Figura 3.8 - Modelo da seção transversal de um elemento da viga

O dano foi introduzido de forma percentual, sendo a nova espessura, do elemento com dano (b'), calculada pela equação 3.9.

$$b' = b - b \times \%_{dano} \quad (3.9)$$

Para uma secção sem dano, o cálculo do segundo momento de área em relação ao seu centro de massa (C.M.) pode ser visualizado na Figura 3.9. Nesta o $I_{x^{sd}}$ e $I_{y^{sd}}$ correspondem aos segundos momentos de área para a secção do elemento sem dano.

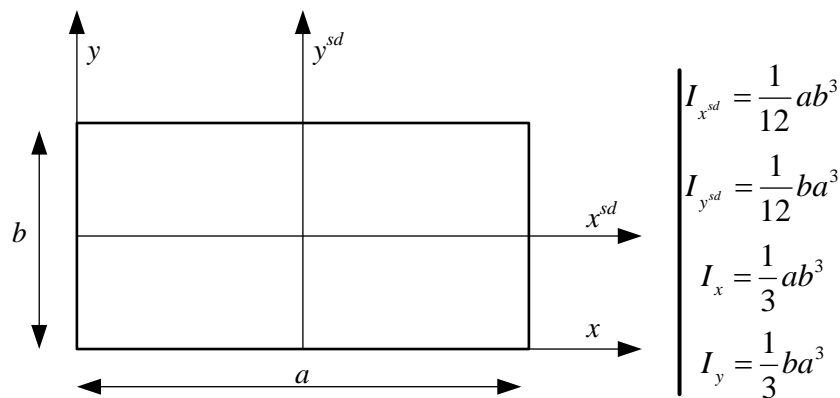


Figura 3.9 - Esquema geral para a obtenção do segundo momento de área de uma secção retangular [40]

No entanto, ao retirar parte do material da seção, reduzindo a espessura de forma gradual, o centro de massa da secção danificada desloca-se para baixo, mantendo o eixo de simetria vertical, logo apenas o segundo momento de área em torno do eixo x varia.

É então necessário utilizar o Teorema dos Eixos Paralelos, de forma a calcular o segundo momento de área, não em relação ao eixo do centro de massa da secção danificada ($I_{x^{cd}}$), mas sim em relação ao eixo do centro de massa de uma secção sem dano ($I_{x^{sd}}$), como representado na Figura 3.10, onde o eixo x^{cd} corresponde ao eixo que passa no C.M. da secção com dano e o eixo x^{sd} ao eixo que passa no C.M. da secção sem dano. Já d corresponde à distância entre estes dois eixos mencionados a cima.

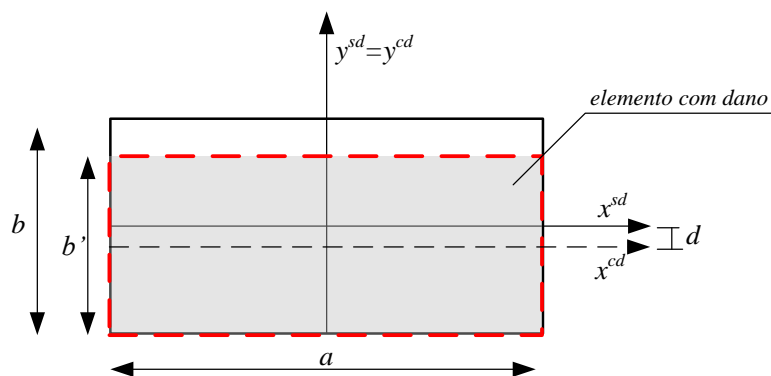


Figura 3.10 - Esquema representativo dos eixos para a secção transversal após redução de espessura

O Teorema dos Eixos Paralelos é representado pela seguinte equação:

$$I = \bar{I} + Ad^2 \quad (3.10)$$

sendo I o segundo momento de área do eixo que se pretende, \bar{I} o segundo momento de área em relação ao centro de massa, A a área da secção e d a distância entre o centro de massa e o eixo que se pretende.

Aplicando o Teorema dos Eixos Paralelos para a secção da Figura 3.10, é então possível calcular o segundo momento de área na secção com dano, correspondente ao eixo do C.M. para a secção sem dano, obtendo as seguintes equações:

$$I_{x^{sd}} = I_{x^{cd}} + A_d d^2 \quad (3.11)$$

com

$$I_{x^{cd}} = \frac{1}{12} ab'^3 \quad (3.12)$$

$$A_d = b' \times a \quad (3.13)$$

$$d = \left(\frac{b - b'}{2} \right) \quad (3.14)$$

Ao efetuar a substituição das equações 3.12, 3.13 e 3.14 na equação 3.11 resulta:

$$I_{x^{sd}} = \frac{1}{12} ab^3 + b' \times a \times \left(\frac{b - b'}{2} \right)^2 \quad (3.15)$$

Caso não se utilizasse o Teorema dos Eixos Paralelos, e se aplicasse diretamente a fórmula do segundo momento de área para o C.M, a simulação do elemento de dano também seria possível. No entanto, isto corresponderia a retirar a mesma quantidade de material de cima e de baixo da secção mantendo o C.M. coincidente com a secção sem dano, o que está patente na Figura 3.11. Mas como o objetivo seria simular o dano tipo fenda/entalhe, que é mais típico de acontecer numa viga (exemplo fissura), optou-se pela primeira opção.

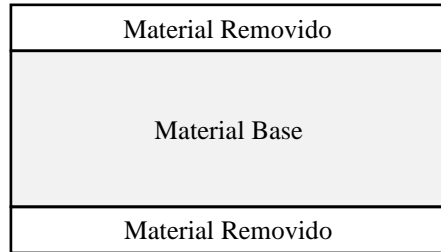


Figura 3.11 - Secção transversal de um elemento, caso se calculasse segundo momento de área em torno C.M.

Introdução do dano na estrutura

Como dito anteriormente, o dano consiste numa remoção de material de um elemento, que irá então apresentar uma redução de massa e de rigidez quando comparado aos outros elementos, fazendo-se sentir nas matrizes de rigidez locais (K_e e M_e) do elemento com dano.

Nas equações 3.6 e 3.7 (equação das matrizes de massa e rigidez locais), são visíveis quais os fatores que influenciam estas matrizes. Ao reduzir a espessura do elemento considerado com dano, iremos ter uma redução da área e do segundo momento de área deste elemento que, por sua vez, causará uma diminuição das matrizes M_e e K_e , respetivamente.

A assemblagem das matrizes locais de um elemento com dano (M_e^d, K_e^d) com as dos restantes elementos processa-se de igual forma, ou seja, ao aplicar o dano ao elemento desejado, iremos ter os graus de liberdade associados a esse elemento, que servirão para alocar as suas matrizes M_e^d e K_e^d nas matrizes de rigidez e massa globais.

3.5.2 Efeito do dano

Como referido anteriormente, ao introduzir dano numa estrutura, regra geral, diminui-se a rigidez da mesma. Esta perda de rigidez causa uma alteração nas propriedades modais da estrutura original, mais especificamente, uma diminuição das frequências naturais, tal como é comprovado pela equação 2.1.

Por sua vez, a diminuição das frequências naturais origina desvios das curvas das FRFs, ou seja, introduzindo um dano numa estrutura sem dano prévio, iremos obter novas FRFs (com dano). Estas sofrem um deslocamento para a esquerda do gráfico, o qual está associado a uma diminuição das frequências naturais, demonstrado na Figura 3.12. No entanto, esta variação não é constante para todas as frequências naturais.

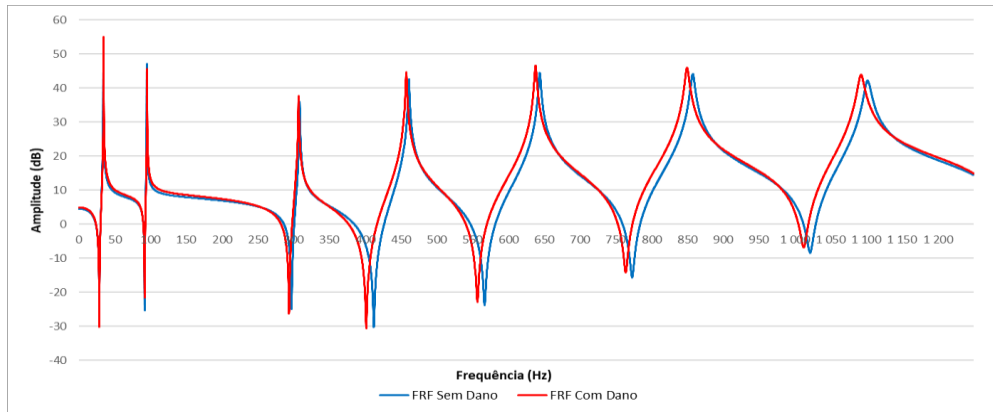


Figura 3.12 - Comparação das FRFs de translação (A5_5) entre uma estrutura com e sem dano

3.6 Metodologia aplicada para a deteção e localização de dano

3.6.1 Descrição dos indicadores utilizados para a identificação de dano

Os indicadores utilizados para avaliar a deteção, localização e quantificação relativa do dano procuram avaliar a correlação existente entre duas curvas, neste caso, entre duas FRFs, com e sem dano.

Para uma deteção de dano mais fiável, convém ter uma base de FRFs da estrutura sem dano para poder ser feita uma comparação com medições posteriores. No entanto, nem sempre se consegue obter as FRFs da estrutura quando esta iniciou o seu funcionamento (considerada sem dano) ou

sã. Nestes casos, estes indicadores poderão continuar a ser utilizados, sendo considerado o momento inicial aquele em que foi feita a primeira medição, que será depois comparada com medições posteriores. Neste caso, as variações verificadas serão sempre em relação ao momento da primeira medição e não à situação em que a estruturas é considerada sem dano.

Deste modo, escolheram-se quatro indicadores diferentes de comparação de FRFs com e sem dano, descritos abaixo.

- Razão: neste indicador efetua-se o módulo do quociente entre as FRFs com dano (CD) e sem dano (SD), para cada frequência (ω), como evidenciado na equação 3.16. Caso não exista dano, o indicador da razão terá o valor de 1, a cada frequência.

$$Razão(\omega) = \left| \frac{H_{ij}^{CD}(\omega)}{H_{ij}^{SD}(\omega)} \right| \quad (3.16)$$

- Erro Relativo: este indicador consiste no módulo do erro relativo entre as FRFs com e sem dano, para cada frequência, como referido na equação 3.17. Este irá variar entre o valor 0 e 1, sendo igual a 0 quando não há dano.

$$Erro(\omega) = \left| \frac{H_{ij}^{CD}(\omega) - H_{ij}^{SD}(\omega)}{H_{ij}^{SD}(\omega)} \right| \quad (3.17)$$

- *Cross Signature Scale Factor* (CSF): este critério, regido pela equação 3.18, analisa discrepâncias entre amplitudes de duas FRFs, com e sem dano, para uma dada frequência, sendo um método muito sensível ao amortecimento utilizado. Varia entre 0 e 1, assumindo o valor 1 quando não existe discrepâncias (não existe dano) [41].

$$CSF(\omega) = \frac{2 \cdot |(H_{ij}^{CD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{SD}(\omega)|}{\left((H_{ij}^{CD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{CD}(\omega) \right) + \left((H_{ij}^{SD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{SD}(\omega) \right)} \quad (3.18)$$

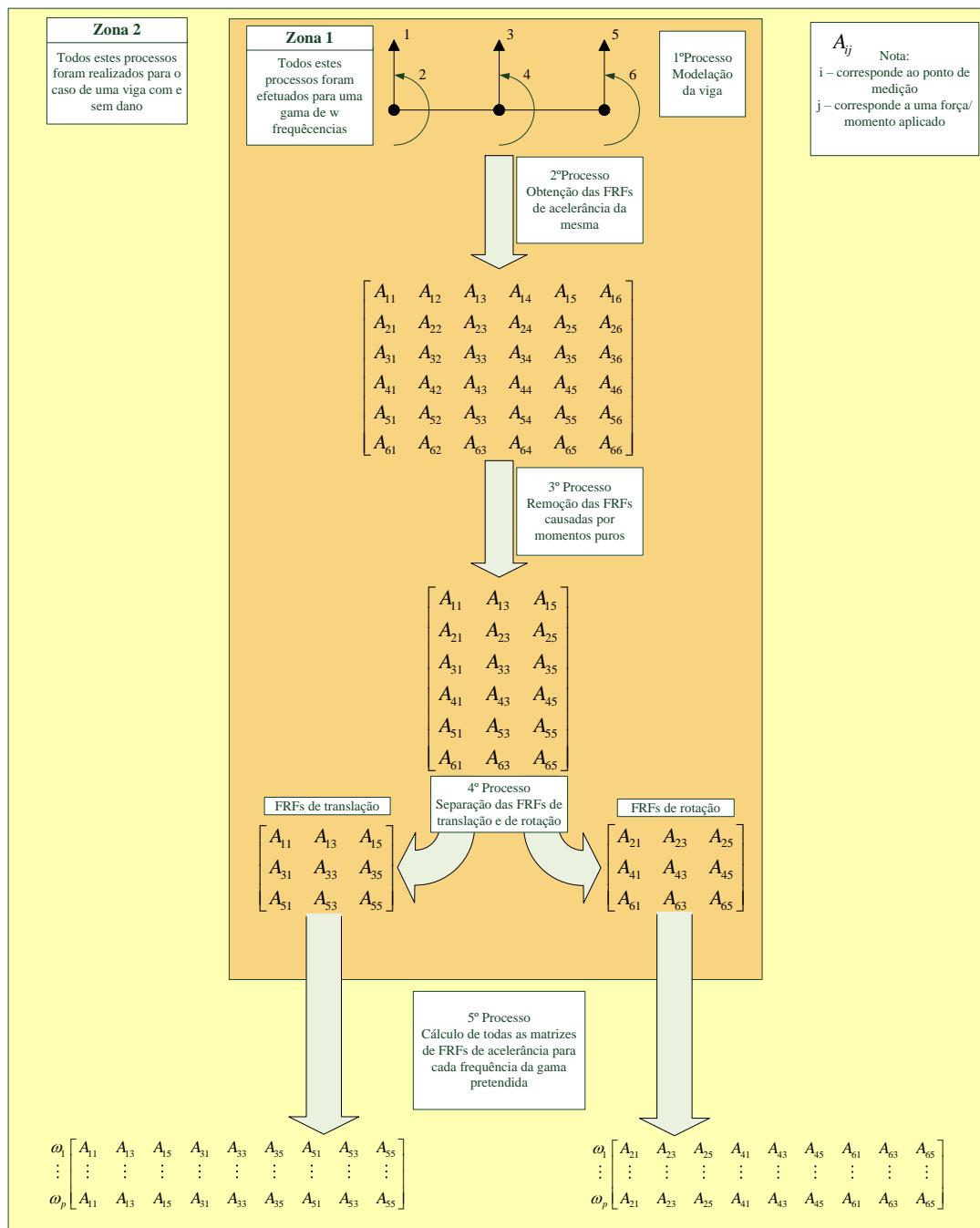
onde H^* representa o complexo conjugado.

- Coerência (Coe): este critério verifica a correlação entre duas curvas, através da equação 3.19. Este varia entre 0 e 1, correspondendo 1 a uma correlação perfeita entre as FRFs com e sem dano, para uma dada frequência, ou seja, à não existência de dano [42].

$$Coe(\omega) = \frac{\left(H_{ij}^{CD}(\omega) + H_{ij}^{SD}(\omega) \right) \cdot \left((H_{ij}^{CD}(\omega))^* + (H_{ij}^{SD}(\omega))^* \right)}{2 \cdot \left[\left((H_{ij}^{CD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{CD}(\omega) \right) + \left((H_{ij}^{SD}(\omega))^* \cdot H_{ij}^{SD}(\omega) \right) \right]} \quad (3.19)$$

3.6.2 Metodologia desenvolvida

Como dito anteriormente, no trabalho em questão pretende-se desenvolver uma metodologia capaz de detetar, localizar e quantificar o dano, aplicando os indicadores às FRFs de aceleração obtidas diretamente da viga. Na Figura 3.13 está representado um esquema resumo da metodologia desenvolvida.



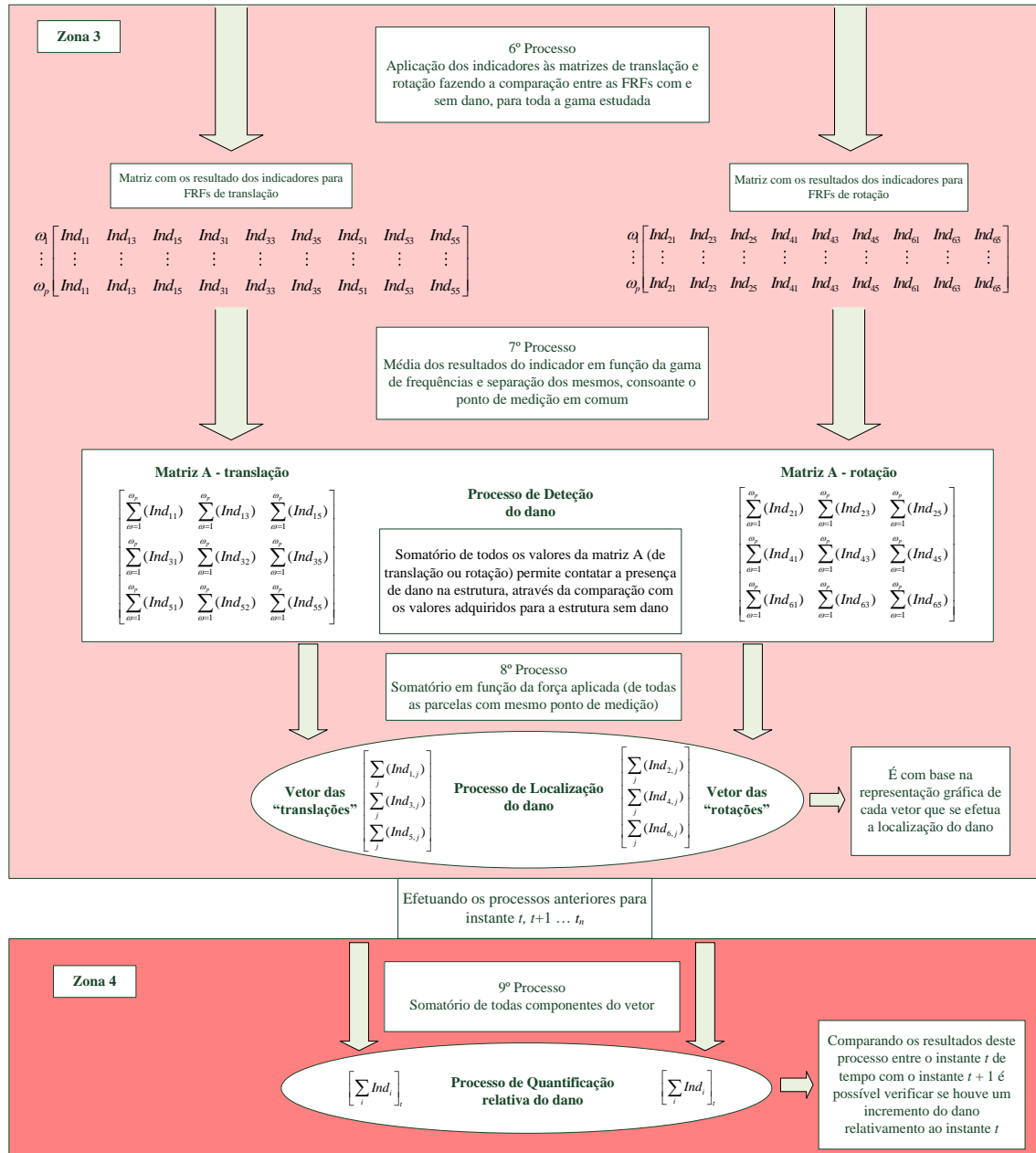


Figura 3.13 - Esquematização da metodologia desenvolvida

Ao analisar a figura acima, é perceptível a divisão em quatro zonas diferentes.

A Zona 1 corresponde à componente da simulação, onde é modelada a estrutura e retirada a matriz das FRFs de Aceleração, já poluídas com o ruído aleatório, para a estrutura com e sem dano. A matriz de Acelerações é uma matriz quadrada, onde as colunas ímpares correspondem a forças aplicadas e as colunas pares a momentos aplicados. Já as linhas ímpares correspondem a translações medidas e as linhas pares a rotações. A dimensão da matriz em questão é $n \times n$, sendo

n o número de graus de liberdade da estrutura (1º e 2º Processo). Nesta zona ainda, são seguidamente retiradas as colunas pares, relativas aos momentos puros aplicados (3º Processo). Esta remoção é feita devido à dificuldade experimental da aplicação de momentos puros. Foram somente consideradas as FRFs obtidas devido à aplicação de forças, resultando uma matriz de dimensão $n \times \frac{n}{2}$. Por fim, a matriz é separada em duas matrizes diferentes, ambas com a dimensão $\frac{n}{2} \times \frac{n}{2}$, uma com as componentes de translação e a outra com as componentes de rotação (4º Processo).

Na Zona 2 são calculadas todas as FRFs de Aceleração (translação e rotação) da estrutura para cada frequência (ω), da gama de frequências estudada. É de referir que cada matriz é distribuída ao longo de uma única linha de uma matriz global, sendo que cada linha corresponde a uma única matriz de Aceleração calculada para uma determinada frequência. No fim deste processo, obtêm-se duas matrizes de dimensão $\omega_p \times \frac{n^2}{4}$, uma para a translação, outra para a rotação. De notar que todos os processos descritos até então foram efetuados para o caso da viga com e sem dano, obtendo assim duas matrizes com as componentes de translação e outras duas matrizes de rotação, para o caso da viga com e sem dano (5º Processo).

Na Zona 3 são aplicados os indicadores que fazem a correlação das matrizes, com e sem dano, relativas às FRFs de translação e rotação (6º Processo). Posteriormente, é efetuada uma média dos resultados dos indicadores que possuem os mesmos índices, para cada uma das matrizes, ao longo da gama de frequência estudada (7º Processo). Após isto, obtém-se um vetor, para a translação e para rotação, com $\frac{n^2}{4}$ elementos, sendo este transformado numa matriz de dimensão $\frac{n}{2} \times \frac{n}{2}$ (matriz A), de forma a separar por linha as parcelas com o mesmo ponto de medição. A partir do valor do somatório de todos os valores presentes nestas matrizes é possível verificar a existência ou não de dano na estrutura, através da comparação deste valor obtido com o valor de referência previamente obtido para a estrutura sem dano, efetuando assim a Detecção do mesmo, processo descrito pela equação 3.20.

$$\sum_{i=1}^{n^{\circ} \text{ pontos}} \sum_{j=1}^{n^{\circ} \text{ forças}} \left(\frac{1}{n^{\circ} \text{ freqs}} \sum_{\omega=1}^{n^{\circ} \text{ freqs}} (\text{Indicador}_{ij}(\omega)) \right) \quad (3.20)$$

onde i corresponde a cada ponto de medição, j a cada força aplicada.

Posteriormente, para cada matriz A (translação ou rotação), efetua-se um somatório, para cada ponto de medição, dos efeitos de todas as forças aplicadas, ou seja, somam-se todos os valores dos indicadores que contêm o mesmo ponto de medição associado (8º Processo). Com este somatório é obtido um vetor com $\frac{n}{2}$ elementos, que contém a informação da afetação de todas as forças a cada ponto de medição. É com base na representação gráfica dos vetores de translação e rotação que é possível proceder à Localização do dano. O processo de localização pode ser expresso pela equação 3.21.

Para cada ponto de medição i (varia de 1 até $n/2$), tem-se:

$$\sum_{j=1}^{n^{\circ}forças} \left(\frac{1}{n^{\circ}freqs} \sum_{\omega=1}^{n^{\circ}freqs} (Indicador_{ij}(\omega)) \right) \quad (3.21)$$

Na Zona 4 para cada um dos vetores (translação ou rotação) efetuou-se um somatório de todas as parcelas, considerando agora a soma de todas as afetações medidas em cada ponto de medição (9º Processo). No final deste processo obtém-se um único valor, onde estão contabilizadas todas as perturbações medidas pelos pontos de medição, para cada instante t de tempo. Comparando os resultados obtidos para instantes diferentes de tempo (inspeções à estrutura) pode obter-se um gráfico que permite realizar uma Quantificação Relativa de uma possível progressão do dano, processo este resumido na equação 3.22.

Para cada ensaio realizado a um instante t diferente:

$$\left[\sum_{i=1}^{n^{\circ}pontos} \sum_{j=1}^{n^{\circ}forças} \left(\frac{1}{n^{\circ}freqs} \sum_{\omega=1}^{n^{\circ}freqs} (Indicador_{ij}(\omega)) \right) \right]_t \quad (3.22)$$

4 Casos de estudo

Um dos objetivos deste trabalho é a localização do dano com base na medição direta das FRFs da estrutura. De forma a conseguir uma deteção precisa é importante perceber quais os indicadores mais eficazes, dos apresentados na secção 3.5.

Outro dos objetivos é tentar perceber quais os fatores que podem ter impacto nessa correta deteção e localização do dano numa estrutura, nomeadamente:

- Local onde o dano se situa;
- Efeito do nível de dano aplicado;
- Gama de frequência considerada;
- Número de forças aplicadas;
- Localização das forças aplicadas;
- Existência de vários danos na estrutura;
- Número dos sensores/pontos de medição.

Neste capítulo, estão descritos quais os casos de estudo realizados, bem como os resultados obtidos a partir dos mesmos e as conclusões retiradas.

4.1 Caso de estudo 1 – Otimização dos ensaios

Para o primeiro caso de estudo, estando já definidos os valores do amortecimento e do ruído introduzido na simulação, foi necessário perceber qual o número ótimo de elementos a utilizar na modelação da malha de elementos finitos da viga, para que o esforço computacional, em termos de tempo, não fosse excessivo.

Para tal, considerou-se uma viga onde supostamente estariam 12 acelerómetros distribuídos ao longo do seu comprimento, com um espaçamento entre eles de 90mm, como representado na Figura 4.1 **Erro! A origem da referência não foi encontrada..** De referir que o primeiro e o último acelerómetros estão afastados 5mm das extremidades da viga. Nesta figura são ainda apresentados os pontos de aplicação das forças, observando que os pontos onde os acelerómetros

estariam colocados são considerados simultaneamente pontos de medição (translações e rotações) e de aplicação das forças de excitação consideradas.

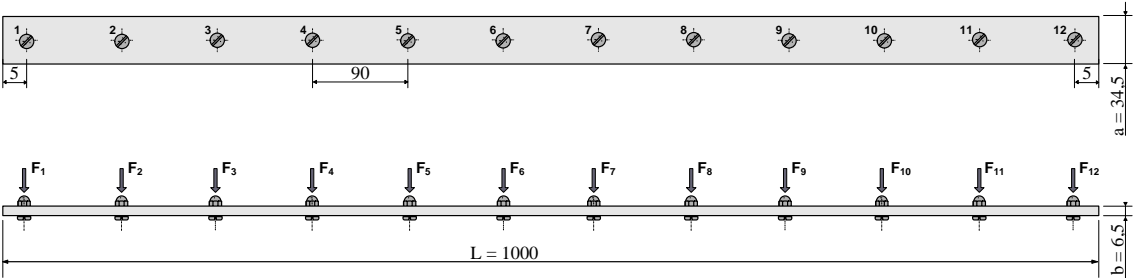


Figura 4.1 - Esquema da viga com a posição dos sensores (mm)

Na Figura 4.2 está representada a viga com os pontos de medição associados e os respectivos GDL.

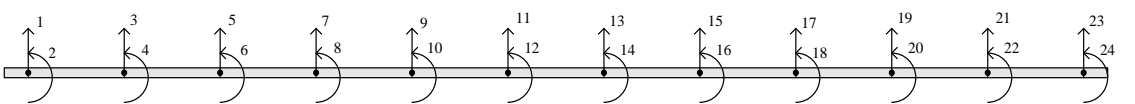


Figura 4.2 - GDL associados a cada acelerómetro

Na Tabela 4.1 está indicada a numeração de cada sensor, GDL e posição que este ocupa na viga.

Tabela 4.1 - Dados relativos à posição e numeração dos sensores

Número do Sensor	Grau de Liberdade	Posição na Viga (cm)
1	1/2	0,5
2	3/4	9,5
3	5/6	18,5
4	7/8	27,5
5	9/10	36,5
6	11/12	45,5
7	13/14	54,5
8	15/16	63,5
9	17/18	72,5
10	19/19	81,5
11	21/22	90,5
12	23/24	99,5

Convergência de malha

Estando definida a estrutura a modelar, é necessário definir qual o número ótimo de elementos finitos a utilizar na malha da estrutura, por forma a que o resultado dos indicadores convirja para um determinado valor.

Inicialmente, dividiu-se a viga em N_e elementos iguais, resultando um vetor V com (N_e+1) valores, onde cada valor corresponde à coordenada de um nó de um certo elemento. Nos ensaios efetuados na convergência de malha definiu-se que a variável N_e iria tomar os seguintes valores 1, 50, 100, 150, 250, 500 e 1000 elementos. Na Figura 4.3 está representado um esquema da malha da viga, considerando um N_e de três elementos, a título de exemplo, estando as suas coordenadas marcadas pelas linhas verticais pretas.



Figura 4.3 - Esquema da malha da viga considerando N_e igual a 3

Posteriormente, devido ao facto de as coordenadas dos elementos criados nem sempre coincidirem com as coordenadas dos pontos de medição pretendidos, foram adicionados ao vetor anterior as coordenadas dos pontos de medição. Isto é, quando no vetor inicial V , as coordenadas dos elementos não coincidiam com as coordenadas dos pontos de medição, a coordenada do ponto de medição não coincidente foi adicionada ao vetor V , criando assim um novo elemento. Assim a viga irá ter tantos elementos, quanto o N_e escolhido, mais o número de coordenadas adicionadas.

Esta adição de novas coordenadas origina novos elementos de diferentes tamanhos. Na Figura 4.4 está representado um esquema da malha da viga, que mostra o resultado da adição das coordenadas dos pontos de medição ao vetor V anterior, considerando um N_e de 3 elementos. De realçar que o uso de 1 elemento apenas na viga serviu para medir os resultados apenas considerando os pontos de medição considerados.



Figura 4.4 - Esquema da malha da viga considerando a adição das coordenadas dos pontos de medição

Nos ensaios da convergência de malha, foram analisados os resultados dos quatro indicadores, considerando 3 localizações (5, 34 e 86cm) e 3 níveis de dano diferentes (2, 5 e 15%). Nestes

ensaios apenas se analisou a sensibilidade de detecção de cada indicador, retirando sempre e apenas as FRFs dos pontos de medição acima indicados, Tabela 4.1, independentemente do número de elementos considerado. Na Tabela 4.2 estão apresentados os valores considerados para cada uma das seguintes variáveis (N_e , Localização do dano, Percentagem de dano).

Tabela 4.2 - Variáveis e valores estudados para efetuar a análise da convergência de malha

N_e	Localização do dano (cm)	Percentagem dano (%)
1	5 34 86	2 5 15
50		
100		
150		
250		
500		
1000		

Como foi indicado no subcapítulo 3.4, os indicadores, Razão, CSF e Coe apresentam valor 1 quando não existe dano, enquanto que o Erro apresenta um valor 0. Sabendo que foram considerados 12 pontos de medição, sendo que por cada ponto se registaram 12 deslocamentos/rotações, um por cada uma das forças aplicadas, no total obteve-se duas matrizes quadradas de dimensão igual a 12, uma para as translações, outra para as rotações.

Ao efetuar o somatório de todos os elementos de cada matriz, para o caso de não existir dano, obtém-se um valor de 144 (para os indicadores da Razão/CSF e Coe) ou de 0 (para o Erro).

Por forma a poder comparar a sensibilidade dos indicadores Razão, CSF e Coe com o indicador Erro, para cada ensaio, para os indicadores da Razão, CSF e Coe, efetuou-se o módulo da diferença entre cada somatório final de cada matriz A (Figura 3.13) com o valor de 144 (que corresponde ao total obtido para a situação sem dano), ficando-se apenas com a componente da discrepância produzida pelo dano.

De realçar que para estes ensaios realizados, considerou-se que não existia ruído, de forma a compreender o verdadeiro impacto do número de elementos nos resultados (sem estes estarem poluídos).

Ao analisar os resultados obtidos verificou-se que a partir dos 100 elementos de viga, os indicadores começavam a apresentar uma convergência de resultados e, como tal, considerou-se,

nos ensaios posteriores, a utilização de $N_e=150$ elementos, de modo a que o custo computacional em termos de tempo gasto em cada análise não fosse demasiado elevado.

Nas Figura 4.5 e Figura 4.6, apresentam-se os resultados para o indicador da Razão e Coe, respetivamente, para um caso de ter um dano localizado a 34cm, com uma redução de espessura de 15%. Nestas figuras é visível a sensibilidade destes indicadores ao aumento do número de elementos.

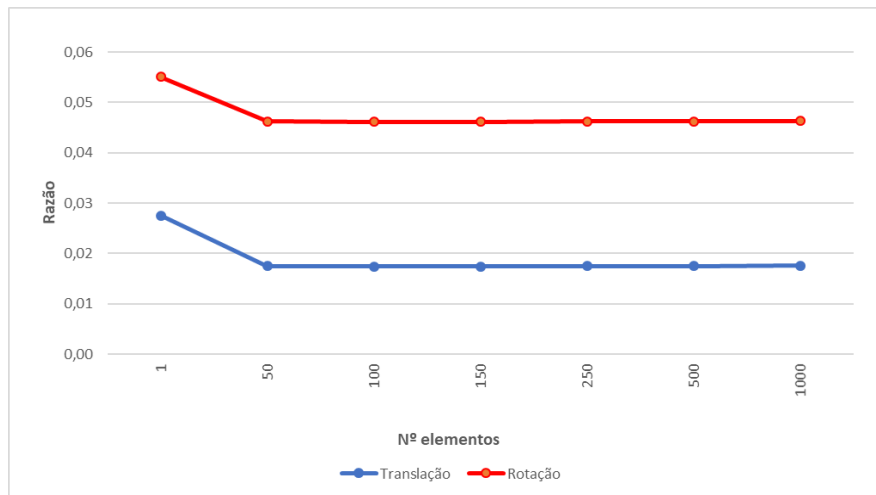


Figura 4.5 – Sensibilidade do indicador da Razão em função do número de elementos utilizado, considerando uma dano a 34cm com uma redução de espessura de 15%

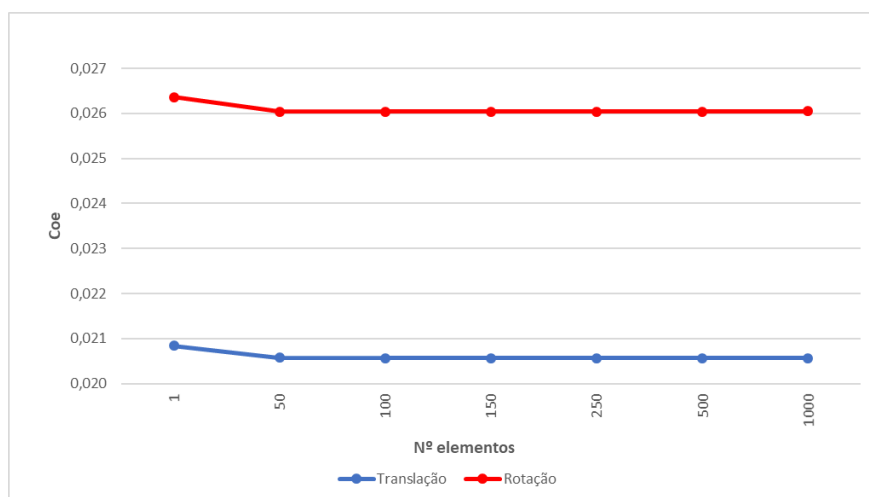


Figura 4.6 - Somatório das discrepâncias medidas pelo Coe, em função do número de elementos utilizado, considerando uma dano a 34cm com uma redução de espessura de 15%

4.2 Caso de estudo 2 – Efeito da localização, nível de dano e presença de ruído nas FRFs

Para perceber melhor o impacto da localização do dano ao longo da estrutura, foi aplicado um dano singular em diferentes posições da viga. Para cada uma dessas localizações, considerou-se um dano com 1mm de largura, e diferentes níveis de dano (severidade do dano/redução da espessura). De notar que, para cada localização e percentagem de dano aplicado, foi feito um único ensaio, sendo a gama de frequências estudada a variar entre 0,25 e 1250Hz, com uma resolução de 0,25 Hz.

Na gama em estudo, estavam presentes 8 modos flexíveis de vibração. É ainda de referir que todos estes ensaios foram realizados com e sem ruído (2%), com o objetivo de perceber qual o efeito deste na correta identificação no dano. Na Tabela 4.3 são referidas as posições de cada um dos danos aplicados, representados na Figura 4.7. Na Tabela 4.4 estão indicadas as percentagens de dano utilizadas, com a respetiva redução de espessura.

Tabela 4.3 - Localização dos danos

<i>Dano</i>	<i>Posição na Viga (cm)</i>	<i>Pontos de medição envolvidos</i>
1	5	1/2
2	14	2/3
3	24	3/4
4	34	4/5
5	50	6/7
6	66	8/9
7	86	10/11
8	94	11/12

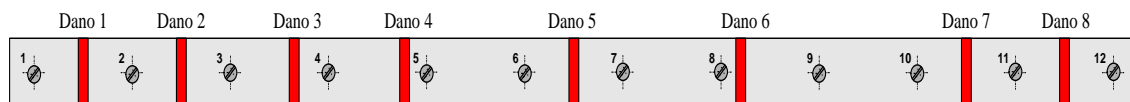


Figura 4.7 - Representação da localização das várias situações de dano

Tabela 4.4 - Níveis de dano aplicados e respectivas reduções de espessura

<i>Percentagem de dano (%)</i>	<i>Redução espessura (mm)</i>	<i>Espessura do elemento com dano (mm)</i>
1	0,065	6,435
2	0,13	6,37
5	0,325	6,175
10	0,65	5,85
15	0,975	5,525
25	1,625	4,875

4.2.1 Efeito da presença de ruído

Como referido anteriormente, o ruído presente nas FRFs é um dos fatores cuja presença pode ter forte impacto na correta identificação do dano. Assim sendo, foi realizado um estudo onde se pretendia perceber qual o seu verdadeiro impacto na identificação do dano.

Analisando os resultados globalmente, pode destacar-se a diferença de sensibilidade que os vetores de deslocamentos e rotações têm ao ruído. De um modo geral, o indicador é mais sensível, quando faz uso do vetor das translações, apresentando uma variação superior entre diferentes ensaios do quando se utiliza o vetor das rotações, o que é visível na Figura 4.8. Nesta, estão representados os vetores de translação (gráfico à esquerda) e de rotação (gráfico à direita) para o caso de um ruído de 2% e 0%. É de referir que estes ensaios foram realizados para um dano localizado a 34cm com uma redução de espessura de 5%. De realçar que a zona a sombreado presente no gráfico, representa a zona onde o dano foi introduzido, sendo o mesmo válido para os restantes gráficos do mesmo género.

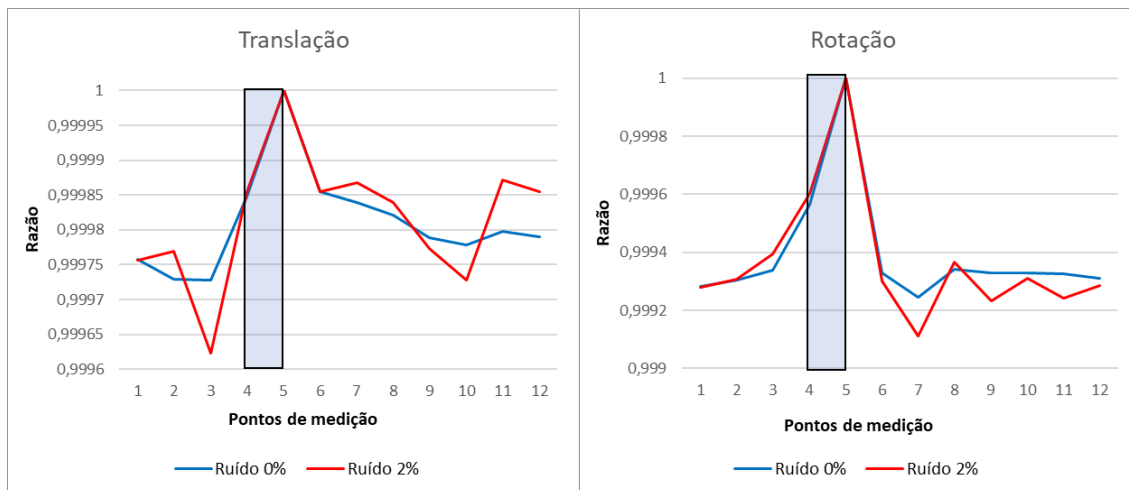


Figura 4.8 - Comparação entre os gráficos dos vetores de translação (à esquerda) e rotação (à direita) para a situação da presença ou não de ruído nas FRFs utilizadas, considerando uma redução de espessura de 5%

Adicionalmente, verificou-se que independentemente da localização do dano, para danos maiores (>5%) os resultados eram concordantes, ou seja, ao efetuar mais que um ensaio o gráfico dos vetores de deslocamentos e das rotações, para o mesmo indicador, eram coincidentes. Pelo contrário, para danos pequenos (<5%), os gráficos revelaram-se bastante díspares, sendo possivelmente devido ao facto de a percentagem de ruído branco aplicado ser da mesma ordem de grandeza da percentagem de dano aplicado. Na Figura 4.9 estão apresentados os resultados para o indicador Coe, para dois ensaios consecutivos, considerando um dano aplicado a 34cm do início da viga e uma redução de espessura de 2% (no gráfico à esquerda) e 10% (no gráfico à direita).

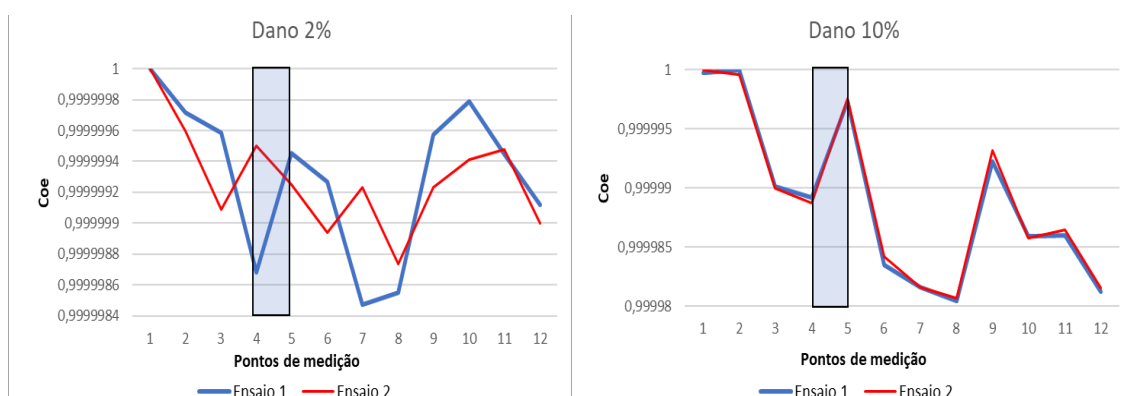


Figura 4.9 - Comparação entre dois ensaios diferentes com uma redução de espessura de 2% (esquerda) e 10% (direita)

Por fim, observou-se que, de entre os quatro indicadores de dano, o mais sensível ao ruído era o indicador Razão, muito possivelmente devido à fórmula usada por este indicador para fazer a comparação entre as FRFs (com e sem dano). Neste indicador é efetuada uma comparação direta entre duas FRFs através da razão das mesmas, onde a adição de uma incerteza é diretamente proporcional ao resultado. Já para os outros indicadores, o efeito da poluição das FRFs é atenuado pela complexidade da fórmula de comparação das FRFs utilizada pelos mesmos.

Nas Figura 4.10 e Figura 4.11, estão representadas as variações do indicador da Razão e Coe, respetivamente. Isto para o ponto de medição 1, relativo à força 1 (Ind_{1-1}), considerando um dano a 34cm da extremidade da viga, com uma redução de espessura de 10%. Os gráficos à esquerda são referentes a um ensaio limpo (sem presença de ruído branco), enquanto que os gráficos à direita apresentam uma poluição dos resultados com um ruído de 2%. Ao analisar os dois gráficos é visível o impacto que o ruído tem em cada um dos indicadores na identificação de dano.

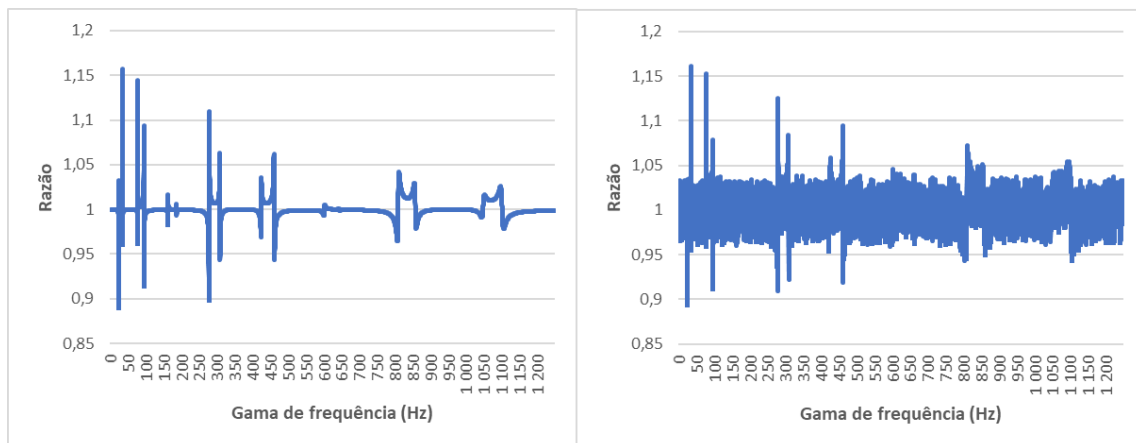


Figura 4.10 - Comparação do valor da Razão₁₋₁ ao longo da frequência, considerando a amostra limpa (esquerda) ou com 2% de ruído (direita), com uma redução de espessura de 10%

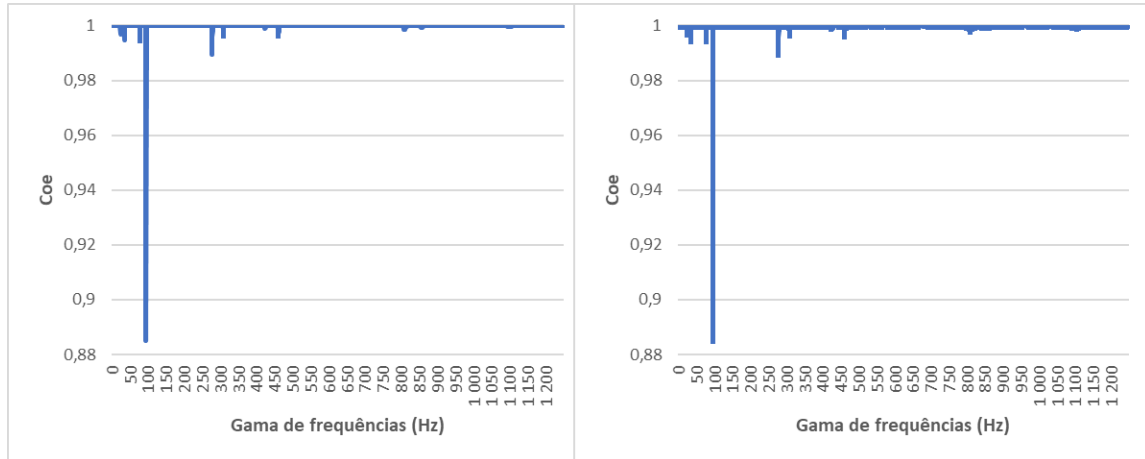


Figura 4.11 – Comparação do valor do Coe_{1_1} ao longo da frequência, considerando a amostra limpa (esquerda) ou com 2% de ruído (direita), com uma redução de espessura de 10%

De modo a minimizar o efeito atrás observado nos resultados dos indicadores, foram implementadas duas medidas diferentes, abaixo descritas:

- 1ª medida: Efetuou-se a média de 5 ensaios, ou seja, foi efetuada a média dos resultados dos indicadores correspondentes obtidos quer para a translação quer para a rotação;
- 2ª medida: Foi efetuada a média de 5 FRFs para o mesmo ponto de medição versus excitação, sendo posteriormente aplicados os indicadores aos resultados das médias das FRFs consideradas medidas.

Comparando os resultados obtidos com a aplicação das duas medidas testadas, verificou-se que a aplicação da 2ª medida permitia uma melhor identificação do dano por parte tanto nas translações como nas rotações. Esta medida foi a que melhor atenuou o efeito do ruído, especialmente para os vetores de translações dos indicadores da Razão e do Erro, que foram os que se mostraram mais sensíveis ao efeito do ruído. Na Figura 4.12 é visível a comparação entre os vetores de translações para o caso da média de 5 ensaios e para o caso da média de 5 FRFs, para a Razão (gráfico à esquerda) e Erro (gráfico à direita). Estes ensaios foram realizados considerando um dano a 5% a 34 cm do início da viga.

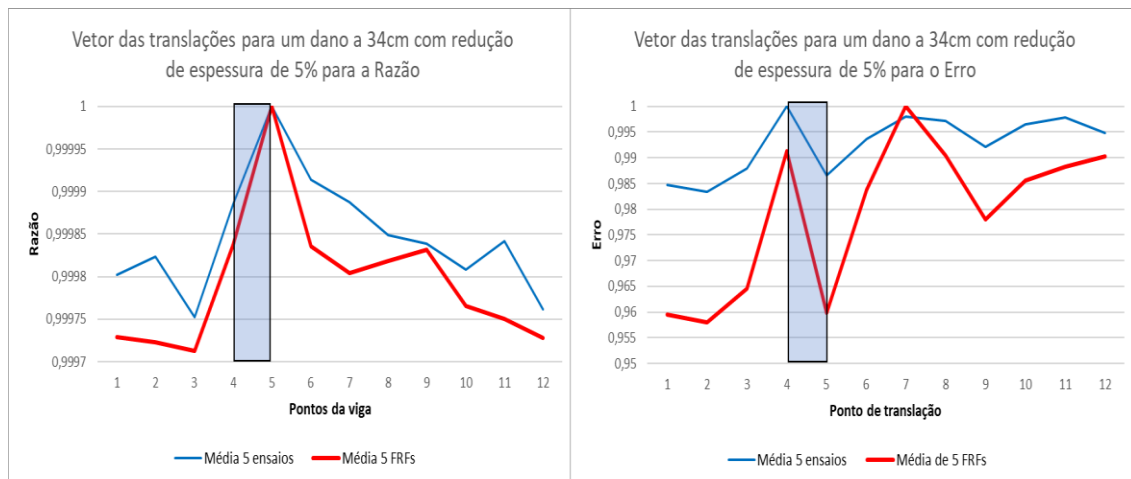


Figura 4.12 - Comparação entre a detecção com base nas médias de 5 ensaios e a média de 5 FRFs, para a Razão (esquerda) e para o Erro (direita)

Na Figura 4.12, para o caso da Razão, implementando a segunda medida, obteve-se um gráfico mais “limpo”, onde se realça a discrepância obtida nos resultados do indicador na zona afetada pelo dano (entre os pontos 4 e 5), observando-se menores perturbações nos restantes pontos. Para o caso do Erro, gráfico à direita, não foi possível localizar o dano, uma vez que são visíveis vários picos.

4.2.2 Eficácia dos indicadores na localização dano

Após definida a malha a utilizar nos MEF, bem como os restantes parâmetros, foram efetuados diversos ensaios, onde se fez variar a posição do dano e a sua dimensão, de modo a perceber como é que os indicadores se comportavam para cada caso de estudo. Nas Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16 apresentam-se os resultados de alguns dos ensaios obtidos para o indicador da Razão, Erro, CSF e Coe, respetivamente. Para cada figura estão representados 4 gráficos, 2 de traslação (linha superior) e 2 de rotação (linha inferior), onde à esquerda está representado o dano localizado a 14cm e à direita o dano localizado a 34cm. De realçar que cada gráfico apresenta os resultados obtidos para cada indicador, para uma redução de espessura de 5 e 10 %. Através da análise destas figuras é possível fazer a análise de quatro importantes fatores

(localização do dano, % de redução da espessura, utilização do vetor de translações/rotações e, por fim, a diferença entre indicador considerado).

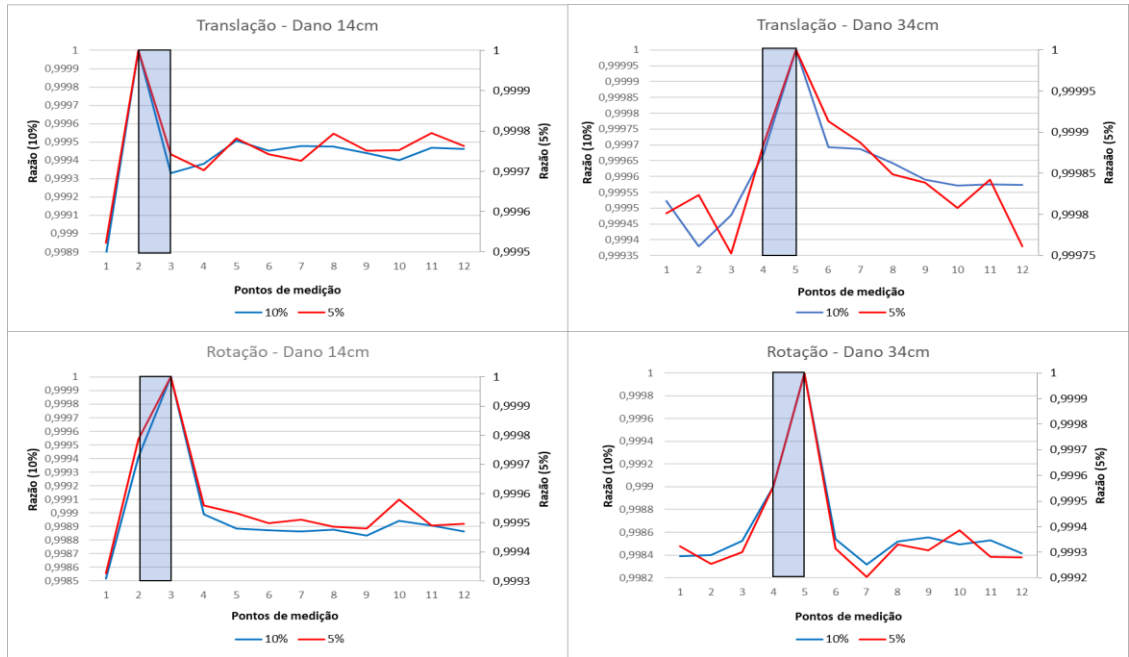


Figura 4.13 – Representação gráfica dos resultados obtidos, para o indicador da Razão, considerando o dano localizado a 14cm (esquerda) e 34cm (direita), com nível de dano de 5 e 10%, relativamente à translação (superior) e rotação (inferior)

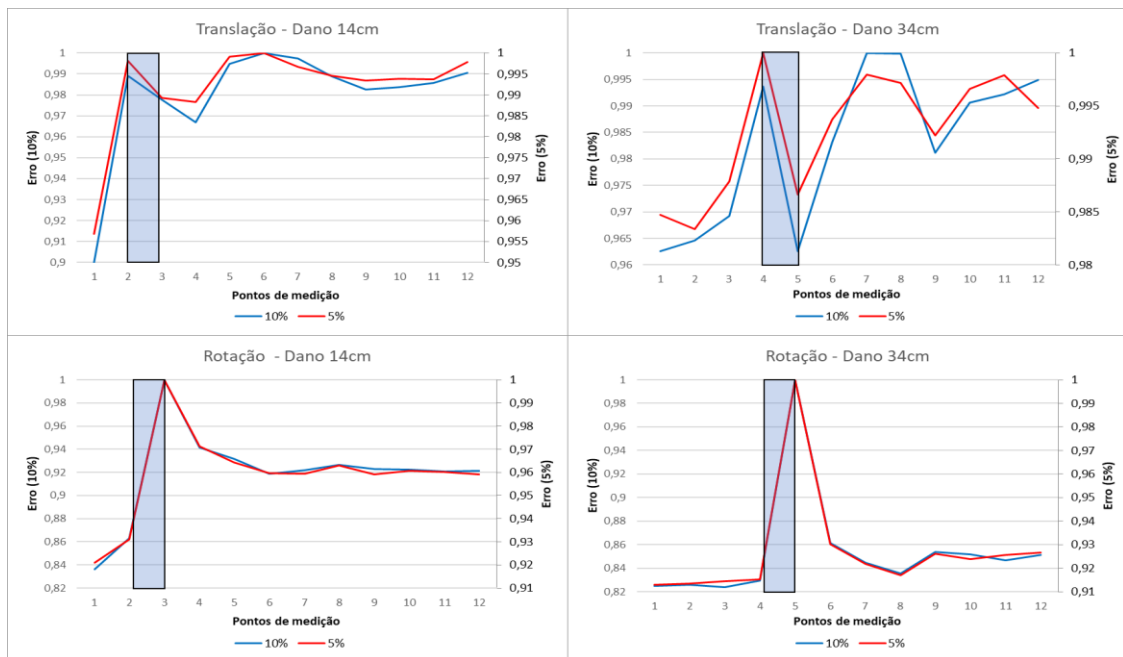


Figura 4.14 – Representação gráfica dos resultados obtidos, para o indicador do Erro, considerando o dano localizado a 14cm (esquerda) e 34cm (direita), com nível de dano de 5 e 10%, relativamente à translação (superior) e rotação (inferior)

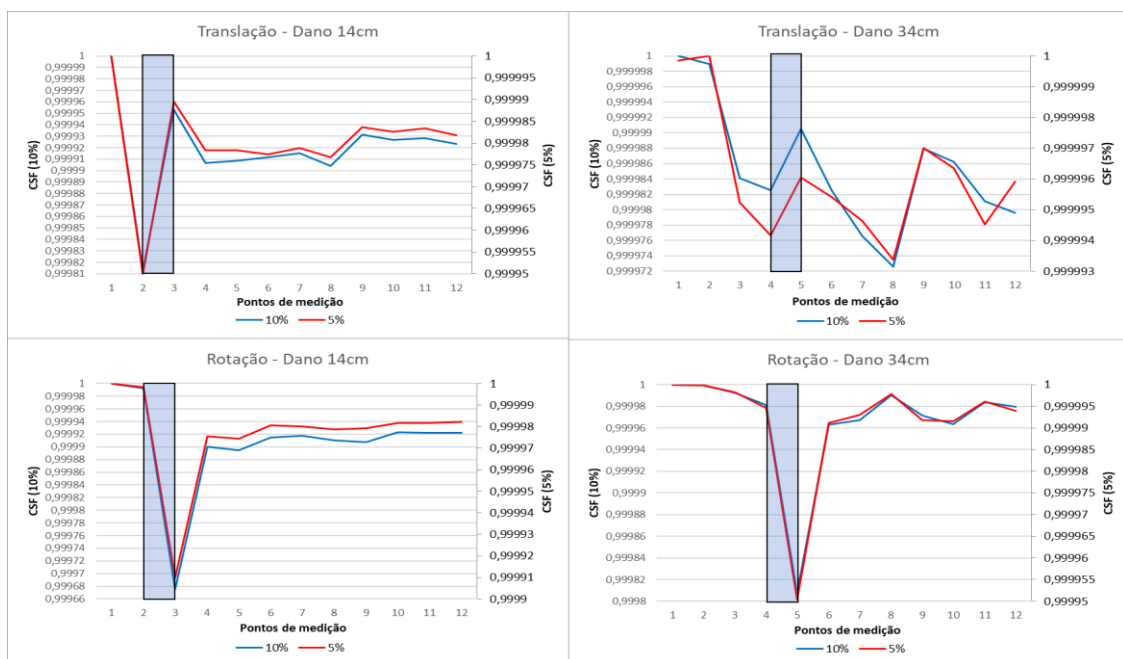


Figura 4.15 - Representação gráfica dos resultados obtidos, para o indicador CSF, considerando o dano localizado a 14cm (esquerda) e 34cm (direita), com nível de dano de 5 e 10%, relativamente à translação (superior) e rotação (inferior)

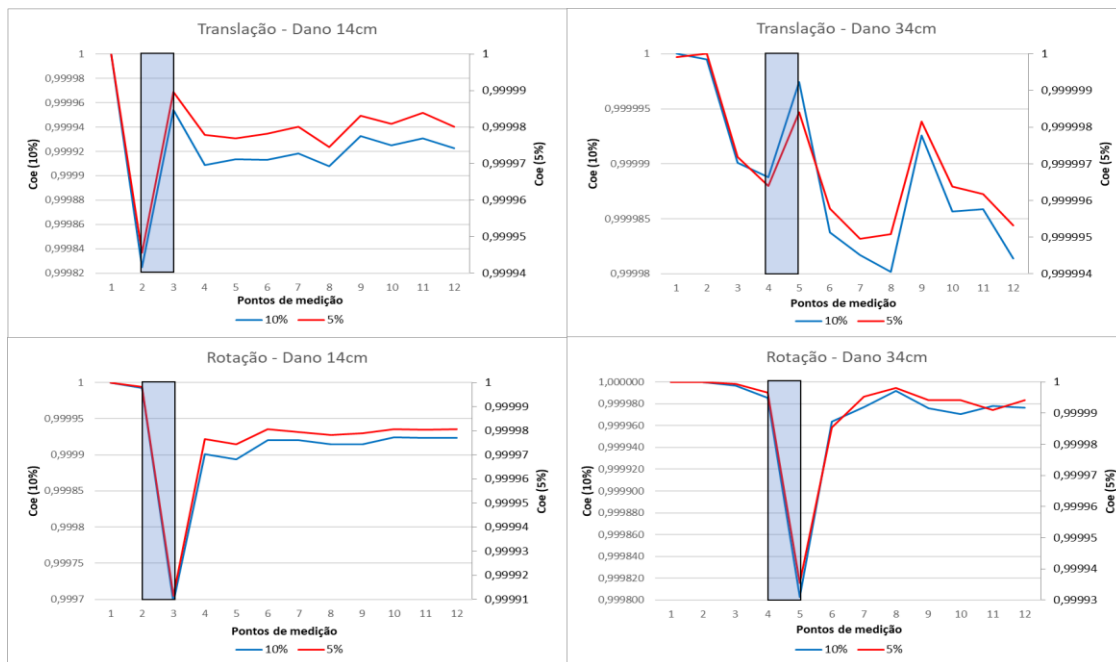


Figura 4.16 - Representação gráfica dos resultados obtidos, para o indicador Coe, considerando o dano localizado a 14cm (esquerda) e 34cm (direita), com nível de dano de 5 e 10%, relativamente à translação (superior) e rotação (inferior)

Ao analisar todos os casos de estudo apresentados nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4, quanto à eficácia na localização do dano, para todas as localizações e para todos os graus de dano considerados, destaca-se o facto da análise com base no vetor das rotações apresentar melhores resultados.

Para a viga em questão, foi considerada uma gama de frequências a variar de 0,25-1250 Hz, verificando-se que a utilização das rotações permitiu a localização correta do dano para quase todos os ensaios, independentemente do indicador utilizado, da localização ou do nível de dano aplicado. Na Tabela 4.5 encontra-se um quadro resumo da eficácia na localização do dano utilizando as medições relativas às rotações, para cada ponto mencionado na Tabela 4.3, tendo sido considerado um dano associado a uma redução de espessura de 10%. Para todas as tabelas a seguir apresentadas foi considerado que cada célula assinalada a verde, significa que foi conseguida a localização correta do dano, enquanto que uma célula assinalada a vermelho significa que não foi possível localizar o mesmo.

Tabela 4.5 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 10% de redução da espessura, consoante o indicador e a localização do dano, considerando FRFs de rotação

<i>Rotação</i>	<i>5cm</i>	<i>14cm</i>	<i>24cm</i>	<i>34cm</i>	<i>50cm</i>	<i>66cm</i>	<i>86cm</i>	<i>94cm</i>
<i>Razão</i>								
<i>Erro</i>								
<i>CSF</i>								
<i>Coe</i>								

Por oposição, a análise com base nas translações apresenta muitas limitações. Considerando os indicadores Erro, Coe e CSF, obtém-se uma eficácia baixa, sendo que apenas se consegue localizar o dano para certas localizações. Na Tabela 4.6 encontra-se um resumo da eficácia na localização do dano aplicado individualmente, com base nas translações, para cada ponto mencionado na Tabela 4.3, considerando um dano com uma redução de espessura de 10%.

Tabela 4.6 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 10% de redução da espessura, consoante o indicador e a localização do dano, considerando FRFs de translação

<i>Translações</i>	<i>5cm</i>	<i>14cm</i>	<i>24cm</i>	<i>34cm</i>	<i>50cm</i>	<i>66cm</i>	<i>86cm</i>	<i>94cm</i>
<i>Razão</i>								
<i>Erro</i>								
<i>CSF</i>								
<i>Coe</i>								

Analisando a tabela anterior, verifica-se que a utilização do indicador da Razão com as translações permitiu obter uma eficácia semelhante à observada aquando da utilização das rotações, verificando-se assim ser este indicador o mais robusto. Para a mesma gama de frequências, o indicador Erro apenas conseguiu detetar o dano perto do centro da viga, enquanto que os indicadores CSF e Coe apresentam resultados idênticos na localização de dano, apenas conseguindo uma boa localização de dano quando este está situado a 14cm de ambas as extremidades da viga (nos pontos 14 e 86 cm).

Todavia, os resultados apresentados nas Tabela 4.5 e Tabela 4.6 não são idênticos para todos os níveis de dano. Verificou-se uma convergência dos mesmos a partir de um nível de dano de 5%. No entanto, para danos inferiores (1 e 2%), os resultados obtidos revelaram-se bastante díspares, tendo como principal motivo o ruído, que pode produzir nos resultados uma variação da mesma grandeza que a produzida pela redução da espessura. Mesmo fazendo uma média das FRFs de de cinco ensaios, os gráficos não se apresentaram similares.

Por fim, a partir da análise dos resultados, é ainda possível constatar a coerência dos mesmos, uma vez que se confirmou que danos aplicados em pontos simétricos na viga, ou seja, danos introduzidos nos pontos de 5, 14 e 34cm, produziram resultados simétricos e semelhantes aos resultados verificados para os pontos 94, 86 e 66cm respetivamente, apesar de os pontos 5/94 não serem exatamente simétricos.

4.2.3 Eficácia dos indicadores na deteção e quantificação relativa do dano

Por forma a perceber a sensibilidade dos indicadores para cada nível e localização de dano, calculou-se o somatório de todas as discrepâncias obtidas nas matrizes de translações e rotações, definidas por Matriz A. Estas foram obtidas para cada indicador, processo este descrito no esquema do algoritmo desenvolvido, presente na Figura 3.13. Na Figura 4.17 estão apresentados os resultados obtidos para o caso de estudo referente à situação de dano localizado a 34cm do início da viga.

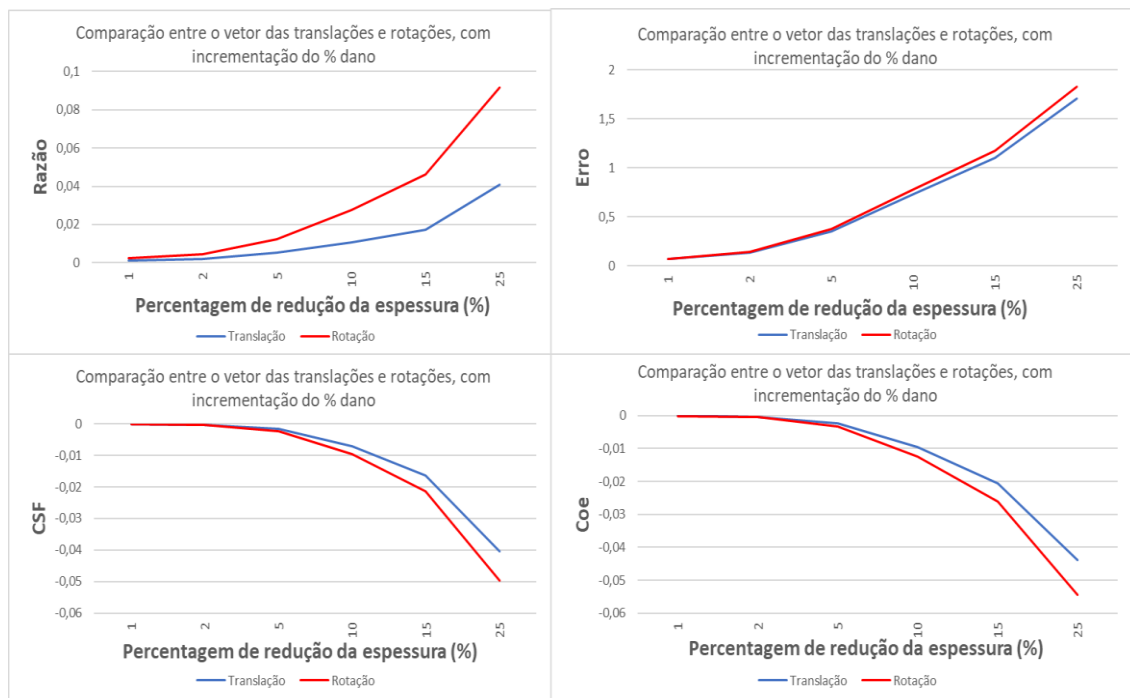


Figura 4.17 - Evolução da detecção de dano com a incrementação da percentagem de redução de espessura para os vetores de translação e rotação, aplicando cada indicador

A partir da análise desta figura, pode perceber-se que o vetor das rotações se mostra mais sensível à presença de dano, quando comparado com o vetor das translações, corroborando as conclusões formuladas relativamente à localização de dano. É ainda possível verificar que o indicador Coe é muito similar ao indicador CSF, o que já se tinha também verificado para o caso da localização de dano.

Adicionalmente, analisando os gráficos, confirma-se que, com o aumento do nível de dano, o valor obtido para o somatório, de todas das discrepâncias medidas (zona 4), também aumenta, facto este que irá permitir uma quantificação relativa do dano, último processo representado no esquema da Figura 3.13.

Neste estudo efetuado, as FRFs de base não continham dano. Contudo, ao executar duas medições espaçadas no tempo e fazendo a sua comparação, é possível perceber se o dano, caso exista, progrediu ou não. Esta constatação é muito importante porque se for realizada uma monitorização contínua na estrutura, podemos avaliar a progressão ou não do dano e agir sobre ele (reparação) antes que consequências nefastas possam ocorrer.

4.3 Caso de estudo 3 - Influência da gama de frequências estudada para a localização do dano

No quarto caso de estudo, analisou-se o efeito da alteração da gama de frequências estudada na identificação da localização do dano. Ao alterar este parâmetro altera-se também o número de modos de vibração presentes na gama em estudo.

Na Tabela 4.7 estão assinalados quais os intervalos de frequência estudados, para este caso, e o número de modos de vibração a estes associados.

Tabela 4.7 - Gamas de frequência estudadas

Gama de Freq. (Hz)	0,25-200	0,25-350	0,25-500	0,25-700	0,25-900	0,25-1250
Nº Modos Afetados	3	4	5	6	7	8

Devido ao facto de a viga ser simétrica, os resultados obtidos para um ponto são equivalentes aos resultados obtidos para o seu simétrico, em relação à vertical. Assim sendo, optou-se por apresentar somente os resultados obtidos para localizações de dano situadas na primeira metade da viga, para as várias gamas de frequências definidas estudar.

Resultados com base no vetor das translações

Nas Tabela 4.8, Tabela 4.9 e Tabela 4.10 são apresentados os resultados obtidos para os indicadores Razão, Erro e CSF/Coe, respetivamente, utilizando a medição das translações. Devido ao facto dos resultados do indicador CSF serem equivalentes aos resultados do indicador Coe, ambos foram representados na mesma tabela. Todos os resultados apresentados de seguida foram obtidos, considerando um dano com uma redução de espessura de 5%, sem a presença de ruído branco, com o objetivo de compreender o verdadeiro efeito da gama de frequências estudada.

Tabela 4.8 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 5% de redução da espessura da viga, em diferentes localizações, obtidos com o indicador Razão, para diferentes gamas de frequência estudada, quando foram utilizadas as FRFs de translação

Razão		Localização do Dano (cm)				
		5	14	24	34	50
Gama de Frequências (Hz)	0,25-200					
	0,25-350					
	0,25-500					
	0,25-700					
	0,25-900					
	0,25-1250					

Tabela 4.9 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 5% de redução da espessura da viga, em diferentes localizações, obtidos com o indicador Erro, para diferentes gamas de frequência estudada, quando foram utilizadas as FRFs de translação

Erro		Localização do Dano (cm)				
		5	14	24	34	50
Gama de Frequências (Hz)	0,25-200					
	0,25-350					
	0,25-500					
	0,25-700					
	0,25-900					
	0,25-1250					

Tabela 4.10 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 5% de redução da espessura da viga, em diferentes localizações, obtidos com o indicador CSF/Coe, para diferentes gamas de frequência estudada, quando foram utilizadas as FRFs de translação

CSF/Coe		Localização do Dano (cm)				
		5	14	24	34	50
Gama de Frequências (Hz)	0,25-200					
	0,25-350					
	0,25-500					
	0,25-700					
	0,25-900					
	0,25-1250					

Ao examinar globalmente os resultados não é possível perceber qual a gama ótima para identificar a localização do dano, já que a afetação por parte da gama de frequências não é a mesma para todas as localizações.

Comparando as três tabelas conclui-se que, independentemente da gama de frequências utilizada, a Razão se revelou o melhor indicador para aplicar quando são utilizadas as FRFs relativas às translações.

No subcapítulo 4.2, verificou-se que através dos indicadores Erro e Coe, para o caso do dano a 5cm da extremidade da viga, não era possível localizá-lo, utilizando as medições das translações. No entanto, através das Tabela 4.9 e Tabela 4.10, é notório que ao reduzir-se a gama de frequências em estudo, contabilizando menos modos de vibração, passou a ser possível identificar o dano. Todavia, para o dano localizado no C.M. (50cm) verifica-se o oposto, deixando de ser possível identificar o dano com a redução da gama de frequências.

É ainda de notar que com a utilização do indicador da Razão, apesar de ter sido possível localizar a maioria dos casos de aplicação de dano estudados, este também se mostrou afetado pela gama de frequências considerada, sendo que para uma gama mais baixa, este indicador apresenta gráficos com uma melhor perceptibilidade da localização do dano. Este efeito não é restrito apenas à extremidade da viga, fazendo sentir-se em todas as localizações de dano consideradas.

Na Figura 4.18 são apresentados, a título de exemplo, dois casos de estudo, com base nos resultados da Razão, utilizando as FRFs de translação, considerando o dano localizado a 5cm da extremidade (gráfico à esquerda) e a 50cm (gráfico à direita), com uma redução de espessura de 5%. Em ambos foi efetuada uma análise com base numa gama de frequências alta e outra com uma gama mais baixa, representadas pela curva a azul e a vermelho, respetivamente.

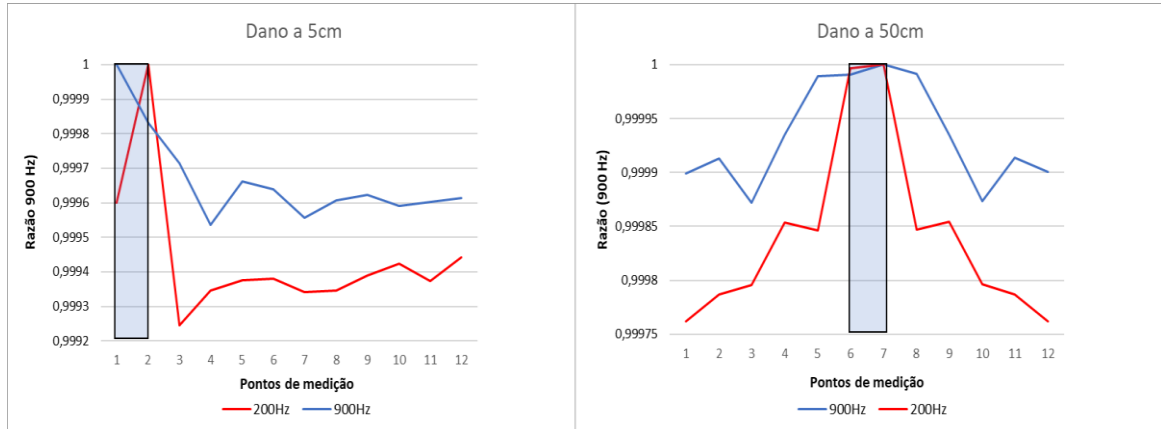


Figura 4.18 - Influência da gama de frequências estudada para um dano com uma redução de espessura de 5%, localizado a 5cm (esquerda) ou a 50cm (direita), com base no vetor das translações

Em ambos os gráficos, é visível que para uma gama mais baixa há uma melhor perceptibilidade da localização do dano. Pode então concluir-se, de modo geral, que, quando são utilizadas medições referentes às translações numa gama de frequências mais baixa, o indicador Razão permite uma melhor localização do dano.

Resultados com base no vetor das rotações

Nas Tabela 4.11, Tabela 4.12 e Tabela 4.13 são apresentados os resultados obtidos para os indicadores Razão, Erro e CSF/Coe, respetivamente, utilizando as medições relativas às rotações. Assim como para os resultados com base no vetor das translações, foi considerado um dano com uma redução de espessura de 5%, sem a presença de ruído branco. Tal como na situação anterior os resultados dos indicadores CSF e Coe foram representados na mesma tabela.

Tabela 4.11 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 5% de redução da espessura da viga, em diferentes localizações, obtidos com o indicador Razão, para diferentes gamas de frequência estudada, quando foram utilizadas as FRFs de rotação

Razão		Localização do Dano (cm)				
		5	14	24	34	50
Gama de Frequências (Hz)	0,25-200					
	0,25-350					
	0,25-500					
	0,25-700					
	0,25-900					
	0,25-1250					

Tabela 4.12 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 5% de redução da espessura da viga, em diferentes localizações, obtidos com o indicador Erro, para diferentes gamas de frequência estudada, quando foram utilizadas as FRFs de rotação

Erro		Localização do Dano (cm)				
		5	14	24	34	50
Gama de Frequências (Hz)	0,25-200					
	0,25-350					
	0,25-500					
	0,25-700					
	0,25-900					
	0,25-1250					

Tabela 4.13 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 5% de redução da espessura da viga, em diferentes localizações, obtidos com o indicador CSF/Coe, para diferentes gamas de frequência estudada, quando foram utilizadas as FRFs de rotação

CSF/Coe		Localização do Dano (cm)				
		5	14	24	34	50
Gama de Frequências (Hz)	0,25-200					
	0,25-350					
	0,25-500					
	0,25-700					
	0,25-900					
	0,25-1250					

Ao examinar globalmente as tabelas anteriormente apresentadas, é notório que, para a maioria das localizações de dano estudadas, os indicadores aplicados às medições referentes à rotação são capazes de localizar o dano, independentemente da gama de frequências escolhida. No entanto, tal não se verifica para todas as situações de localização de dano. Para a situação de danos aplicados próximo da extremidade da viga (5 e 14cm), é bem visível que a capacidade dos indicadores para localizar o dano reduz com a diminuição da gama de frequências estudada.

Para os casos onde foi possível localizar o dano, independentemente da gama de frequências escolhida, é de realçar que a perçetibilidade da localização correta do dano melhora à medida que a gama de frequência estudada é mais alta (Figura 4.19). Também nesta, a gama de frequências alta e a gama de frequências mais baixa, são representadas pela curva a azul e a vermelho, respetivamente.

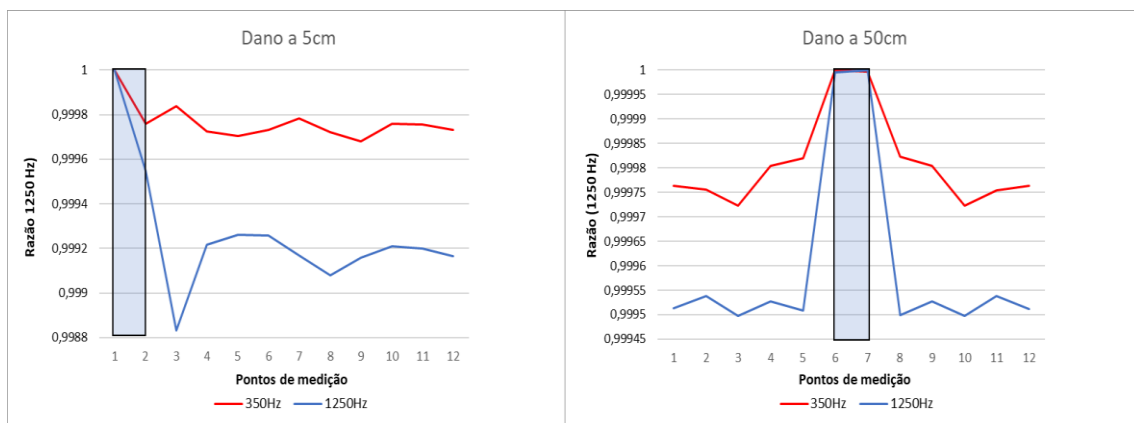


Figura 4.19 - Influência da gama de frequências estudada para um dano com uma redução de espessura de 5%, localizado a 5cm (esquerda) ou a 50cm (direita), com base no vetor das rotações

Nesta figura são apresentados, a título de exemplo, dois casos de estudo, com base nos resultados da Razão, utilizando as FRFs de rotação, considerando o dano localizado a 5cm da extremidade (gráfico à esquerda) e a 50cm (gráfico à direita), com uma redução de espessura de 5%.

Tanto no gráfico situado à esquerda como à direita verifica-se que utilizando uma gama maior, neste caso 1250 Hz, se obteve uma melhor perçetibilidade do dano. Contrariamente ao verificado nos gráficos referentes às translações (Figura 4.18).

4.4 Caso de estudo 4 - Influência da escolha das forças a aplicar para a localização do dano

Outro efeito que se pretendeu estudar, tinha como objetivo perceber qual o efeito do número e da localização das forças aplicadas à estrutura, por forma a conseguir uma melhor eficácia na localização do dano. Para tal, foi necessário compreender qual a afetação que cada efeito produzia, nos vários indicadores estudados, quando eram utilizadas medições referentes às translações ou rotações.

De modo a perceber a influência de cada força aplicou-se a cada matriz A de translações e rotações uma escala de cor. Com esta, atribui-se a cor vermelha aos pontos que produziam maior afetação e a cor verde aos pontos com menor afetação. De notar que para a Razão/Erro os valores mais altos representam uma maior perturbação medida e para os indicadores CSF/Coe verifica-se o oposto sendo os valores mais baixos que representam as maiores perturbações medidas. Assim como no subcapítulo 4.4, neste apenas se analisou os ensaios cujo danos se localizava na primeira metade da viga, devido à simetria da própria.

Após aplicar a escala de cores, para as matrizes de translação e rotação, para cada localização considerada na primeira metade da viga, com uma redução de espessura de 5% e sem qualquer ruído introduzido, é então possível proceder a uma análise global dos resultados. Através do uso da escala de cor é perceptível que a afetação das forças nos pontos de medição varia de indicador para indicador e principalmente varia com a posição do dano, como é visível pelas tabelas 4.14, até à 4.18.

Tabela 4.14 - Mapa de Cores para a Razão, baseado nas FRFs de translação, considerando o dano localizado a 34cm (entre os GDL 7 e 9), com uma redução de espessura de 10%

		Translação															
		Forças															
		1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	Total	Normalização		
GDL associados à translação	1	1,000086	0,999983	0,99974	0,999983	1,001119	0,999969	1,000174	1,000165	1,000094	1,000014	0,999937	1,000029	12,00129	0,99952		
	3	0,999615	1,000048	0,999724	1,000062	1,000884	0,99969	0,999771	0,999906	0,999811	1,000058	0,999975	1,000033	11,99958	0,99938		
	5	0,999662	0,999625	0,999596	1,000409	1,000982	1,000048	1,000028	1,00028	0,999976	1,00003	1,000175	0,999944	12,00076	0,99948		
	7	1,000135	0,999983	0,999977	1,000109	1,001355	1,000257	1,000125	1,000145	1,00034	1,000226	1,000088	1,000341	12,00308	0,99967		
	9	1,001246	1,001097	1,000801	1,001425	1,001562	1,000195	1,000309	0,999951	0,999983	1,000049	1,000093	1,000313	12,00702	1,00000		
	11	1,000073	0,999865	0,999804	0,999905	1,000291	1,000631	1,000306	1,00069	1,000479	1,00045	1,000436	1,000413	12,00334	0,99969		
	13	0,999982	1,000082	1,000128	1,000103	1,000075	1,000539	1,000294	1,000343	1,000458	1,000406	1,000309	1,000539	12,00326	0,99969		
	15	1,000016	0,999997	1,000117	1,000196	1,000092	1,000549	1,00064	1,000309	1,000097	1,000052	1,000383	1,000271	12,00272	0,99964		
	17	1,00005	0,999886	1,000016	1,000189	1,000197	1,000418	1,000477	1,000353	0,999961	1,000048	1,000187	1,000329	12,00211	0,99959		
	19	1,000167	0,999894	1,000041	1,000048	1,000043	1,000583	1,000331	1,000295	1,00009	1,000124	1,000072	1,000198	12,00189	0,99957		
	21	1,000162	0,999913	0,999976	1,000347	1,000111	1,000402	1,000513	1,000278	1,000051	1,000028	1,000083	1,000064	12,00193	0,99958		
	23	1,00014	0,999978	0,999885	1,000204	1,000287	1,000558	1,000412	1,000231	0,999891	0,999937	1,000221	1,000156	12,0019	0,99957		
Soma													144,0289				

Tabela 4.15 - Mapa de Cores para a Razão, baseado nas FRFs de rotação, considerando o dano localizado a 34cm (entre os GDL 8 e 10), com uma redução de espessura de 10%

GDL associados à rotação	Rotação												Forças												Total	Normalização
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23														
	2	0,999799	0,999858	0,999499	1,000402	1,001096	0,999901	1,000028	1,000342	0,999919	0,999947	0,999937	1,00017	12,0009	0,99839											
	4	0,999986	0,999951	0,999949	0,999961	1,001115	0,999996	0,999993	0,999947	1,000217	1,000008	0,999916	0,999971	12,00101	0,99840											
	6	1,000218	1,000428	0,999554	1,000191	1,001209	1,000215	1,000001	1,000171	1,000256	0,999955	1,000022	1,000109	12,00253	0,99852											
	8	1,000809	1,000318	1,000804	1,000639	1,001611	1,000532	1,000555	1,000768	1,000409	1,000556	1,000514	1,000778	12,00829	0,99900											
	10	1,000951	1,000887	1,000579	1,001142	1,000601	1,001885	1,002613	1,002364	1,00227	1,002217	1,002066	1,002673	12,02027	1,00000											
	12	1,000099	1,000278	1,000186	1,000431	1,000527	1,000903	1,000198	0,999972	0,999808	0,999896	1,000085	1,000349	12,00273	0,99854											
	14	1,000185	0,999944	0,999923	0,999901	1,00013	1,000383	0,999599	0,999955	1,000152	0,999899	0,999906	1,000083	12,00006	0,99832											
	16	1,000019	0,999997	0,999962	1,000003	1,000108	1,000053	1,000312	1,001452	1,000076	1,000135	0,999938	0,999957	12,00246	0,99852											
18	1,000213	0,999996	1,000107	1,000135	1,000433	1,000522	1,000286	1,000308	1,000101	1,000242	1,000293	1,000269	12,00291	0,99856												
20	1,000001	0,999954	1,000032	1,000168	0,999962	1,000516	1,000465	1,000062	1,000275	1,000283	1,00019	1,000231	12,00214	0,99849												
22	1,00012	1,000107	0,999958	1,000399	1,000112	1,000341	1,000485	1,000026	1,000302	1,000083	1,000231	1,000194	12,00259	0,99853												
24	1,000005	1,000079	0,999886	1,000295	1,000176	1,000314	1,000291	0,999981	1,000049	1,000099	0,999965	1,000083	12,00122	0,99842												
												Soma	144,0471													

Tabela 4.16 - Mapa de Cores para o Erro, baseado nas FRFs de rotação, considerando o dano localizado a 34cm (entre os GDL 8 e 10), com uma redução de espessura de 10%

GDL associados à rotação	Rotação		Forças											Total	Normalização
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23			
	2	0,016108	0,015898	0,016121	0,016357	0,015344	0,015087	0,015008	0,014715	0,014828	0,014796	0,014805	0,014852	0,184009	0,82463
	4	0,015721	0,016574	0,016116	0,016472	0,015319	0,014875	0,014946	0,014867	0,014933	0,014774	0,014793	0,01485	0,18424	0,82566
	6	0,016424	0,016167	0,015046	0,01616	0,015614	0,015026	0,014859	0,014883	0,01491	0,014947	0,014943	0,014819	0,183797	0,82367
	8	0,015614	0,015523	0,015469	0,016059	0,016246	0,015276	0,015127	0,015275	0,015135	0,015128	0,01514	0,015062	0,182056	0,82932
	10	0,016393	0,016112	0,016627	0,016476	0,020582	0,018448	0,019437	0,019857	0,0197	0,019578	0,019633	0,020298	0,223142	1,00000
	12	0,014904	0,014887	0,015052	0,015415	0,014927	0,014851	0,017126	0,016934	0,016923	0,016842	0,016973	0,017413	0,192247	0,86154
	14	0,014783	0,014926	0,015036	0,015685	0,015075	0,016157	0,014847	0,016154	0,016402	0,016441	0,016513	0,016471	0,18846	0,84457
	16	0,014842	0,014848	0,015037	0,015651	0,015052	0,015859	0,016269	0,016274	0,015785	0,015568	0,015581	0,015695	0,186461	0,83562
18	0,01476	0,014839	0,014911	0,0155	0,015317	0,015954	0,016696	0,016873	0,016063	0,016458	0,01657	0,016561	0,190503	0,85373	
20	0,014862	0,014877	0,015045	0,015445	0,014913	0,016023	0,016682	0,016789	0,015816	0,016942	0,016271	0,016408	0,190073	0,85180	
22	0,014789	0,014839	0,015312	0,015549	0,014874	0,015924	0,01658	0,016895	0,016154	0,016184	0,016164	0,015642	0,188905	0,84657	
24	0,014782	0,014954	0,015134	0,015452	0,014996	0,016004	0,016672	0,016895	0,01613	0,01642	0,016205	0,016271	0,189915	0,85110	
												Soma	2,286808		

Tabela 4.17 - Mapa de Cores para o Erro, baseado nas FRFs de rotação, considerando o dano localizado a 34cm (entre os GDL 8 e 10), com uma redução de espessura de 10%

		Rotação												23	Total	Normalização
		1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21				
GDL associados à rotação	2	0,999866	0,999869	0,999857	0,999862	0,999878	0,999885	0,999880	0,999890	0,999889	0,999890	0,999889	0,999888	1,99855	1,000000	
	4	0,999868	0,999856	0,999863	0,999860	0,999863	0,999887	0,999887	0,999888	0,999887	0,999889	0,999889	0,999888	1,99854	1,000000	
	6	0,999834	0,999863	0,999857	0,999866	0,999877	0,999884	0,999888	0,999888	0,999888	0,999887	0,999887	0,999889	1,99851	0,999997	
	8	0,999849	0,999867	0,999871	0,999871	0,999804	0,999872	0,999883	0,999858	0,999872	0,999875	0,999875	0,999875	1,99837	0,999885	
	10	0,999838	0,999864	0,999723	0,999851	0,999598	0,999721	0,999647	0,999526	0,999631	0,999638	0,999615	0,999530	1,99618	0,999803	
	12	0,999888	0,999888	0,999868	0,999876	0,999888	0,999889	0,999825	0,999814	0,999830	0,999818	0,999835	0,999869	1,99811	0,999964	
	14	0,999888	0,999888	0,999880	0,999827	0,999885	0,999764	0,999889	0,999855	0,999854	0,999850	0,999847	0,999848	1,99827	0,999977	
	16	0,999888	0,999889	0,999881	0,999871	0,999884	0,999864	0,999863	0,999850	0,999865	0,999872	0,999866	0,999858	1,99845	0,999992	
	18	0,999889	0,999889	0,999885	0,999862	0,999860	0,999853	0,999847	0,999778	0,999856	0,999855	0,999849	0,999835	1,99826	0,999976	
	20	0,999889	0,999888	0,999810	0,999874	0,999887	0,999850	0,999844	0,999810	0,999866	0,999772	0,999845	0,999854	1,99819	0,999970	
	22	0,999889	0,999889	0,999757	0,999873	0,999887	0,999850	0,999850	0,999839	0,999864	0,999856	0,999860	0,999860	1,99828	0,999978	
	24	0,999889	0,999887	0,999849	0,999873	0,999887	0,999840	0,999845	0,999758	0,999863	0,999844	0,999860	0,999864	1,99826	0,999976	
											Soma		143,978			

Tabela 4.18 - Mapa de Cores para a Razão, baseado nas FRFs de rotação, considerando o dano localizado a 14cm (entre os GDL 4 e 6), com uma redução de espessura de 10%

		Rotação													
		Forças													
		1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	Total	Normalizar
GDL associados à rotação	2	0,999868	0,999883	0,999878	0,999884	0,999881	0,999887	0,999885	0,999887	0,999886	0,999886	0,999886	0,999886	11,9986	1,000000
	4	0,999843	0,999880	0,999871	0,999877	0,999878	0,999879	0,999880	0,999879	0,999879	0,999878	0,999879	0,999879	11,9985	0,999992
	6	0,999880	0,999508	0,999729	0,999867	0,999555	0,999628	0,999455	0,999461	0,999466	0,999466	0,999469	0,999462	11,99495	0,999696
	8	0,999886	0,999784	0,999865	0,999820	0,999752	0,999746	0,999771	0,999764	0,999766	0,999726	0,999767	0,999766	11,99741	0,999901
	10	0,999886	0,999744	0,999804	0,999657	0,999783	0,999782	0,999803	0,999769	0,999772	0,999778	0,999779	0,999763	11,99732	0,999894
	12	0,999887	0,999733	0,999819	0,999778	0,999824	0,999886	0,999732	0,999817	0,999795	0,999791	0,999788	0,999792	11,99764	0,999920
	14	0,999885	0,999654	0,999828	0,999755	0,999808	0,999759	0,999887	0,999828	0,999814	0,999802	0,999811	0,999809	11,99764	0,999920
	16	0,999887	0,999683	0,999828	0,999743	0,999771	0,999819	0,999813	0,999760	0,999805	0,999823	0,999826	0,999815	11,99757	0,999915
	18	0,999887	0,999682	0,999829	0,999751	0,999708	0,999797	0,999814	0,999816	0,999792	0,999835	0,999837	0,999827	11,99758	0,999915
	20	0,999887	0,999680	0,999829	0,999752	0,999767	0,999794	0,999824	0,999822	0,999850	0,999814	0,999836	0,999833	11,99769	0,999924
	22	0,999886	0,999683	0,999825	0,999752	0,999775	0,999795	0,999809	0,999819	0,999831	0,999834	0,999833	0,999839	11,99768	0,999924
	24	0,999886	0,999683	0,999828	0,999750	0,999776	0,999782	0,999808	0,999816	0,999831	0,999830	0,999842	0,999844	11,99768	0,999923
Soma														143,9703	

Para a Razão é notório que, de um modo geral, as forças que produzem maiores discrepâncias no resultado dos indicadores, são as forças aplicadas nos pontos de medição perto do local onde o dano está aplicado. No entanto é de salientar que, para os restantes indicadores, apesar de não se destacar uma força em específico, é notório que o ponto de medição onde as maiores discrepâncias foram registadas é o ponto de medição posterior ao elemento que apresenta o dano.

Dito isto, fez-se variar a o número de forças aplicadas à estrutura, para as localizações de dano localizadas a (5, 14, 24, 34 e 50 cm), para os indicadores Razão, Erro e Coe. Neste caso foi apenas considerada a matriz de rotações (Matriz A - rotações, Figura 3.13), pois esta revelou-se a mais eficaz, globalmente, na localização do dano. Na Tabela 4.19 estão assinaladas quais as forças que se considerou para cada tipo de ensaio.

Tabela 4.19 - Quadro resumo dos casos onde se variou as forças de excitação aplicadas

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Forças Aplicadas	Todas	1 e 3	21 e 23	11 13	Força no ponto de medição anterior e posterior à localização do dano

De seguida, são apresentadas várias figuras, onde o gráfico à esquerda contém os resultados dos indicadores considerando a aplicação de todas as 12 forças, caso 1 - linha azul e considerando a forças nos pontos de medição colocados nas extremidades do elemento com dano, caso 5 - linha a vermelho. O gráfico à direita apresenta os resultados para o caso 2, 3 e 4, (linha laranja, cinzenta e amarela, respetivamente). De realçar que todos estes ensaios foram realizados com um dano, cuja espessura foi reduzida em 5% e os indicadores foram baseados nas FRFs de rotação.

Examinando os resultados obtidos para todas as localizações, verificou-se que na Razão ao considerar as forças aplicadas nos sensores que rodeiam o local onde o dano se encontra, obtiveram-se melhores resultados na localização do dano, tendo-se verificado tal, para todos os pontos onde o dano foi implementado, sendo este facto notório na Figura 4.20. Estes resultados vêm confirmar o que já tinha sido observado através do mapa de cores, onde as forças aplicadas perto do dano eram as que produziam maior perturbação.

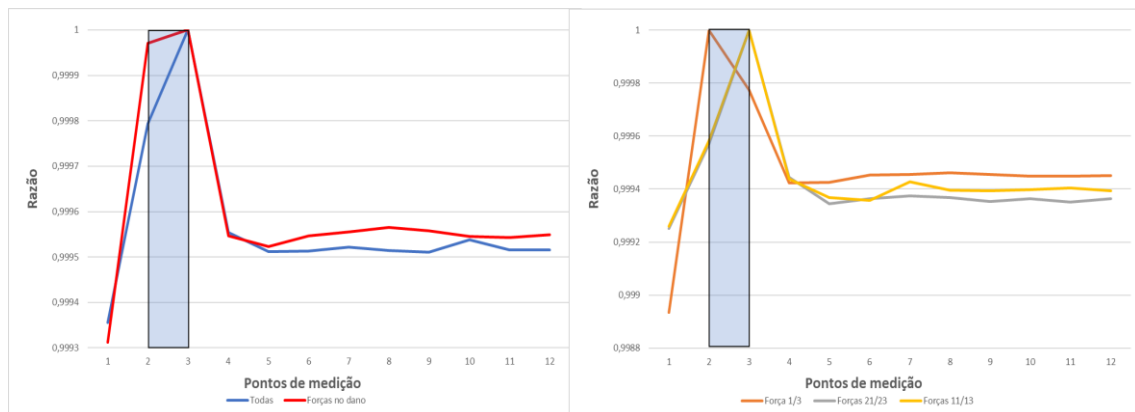


Figura 4.20 – Resultados para o indicador da Razão, considerando o dano a 14cm, com um redução de espessura de 5%

Para o indicador do Erro, como mostra o do mapa de cores, a influência das forças varia com sua localização. Para danos perto da extremidade da viga (5 e 14 cm) verificou-se que os melhores resultados eram obtidos pela aplicação das forças nos pontos próximos do dano, sendo isto visível nos gráficos da Figura 4.21. Para os danos localizados a (24 e 34 cm) os melhores resultados foram obtidos com a utilização de todas as forças ou aplicando apenas forças nos pontos centrais da viga (resultados muito similares), Figura 4.22. Por fim para o dano localizado a 50cm (centro de massa das vigas), verificou-se que os melhores resultados ocorriam quando se aplicavam as 12 forças ou apenas duas forças nos pontos centrais da viga (que neste caso correspondem aos pontos que envolvem o dano), Figura 4.23.

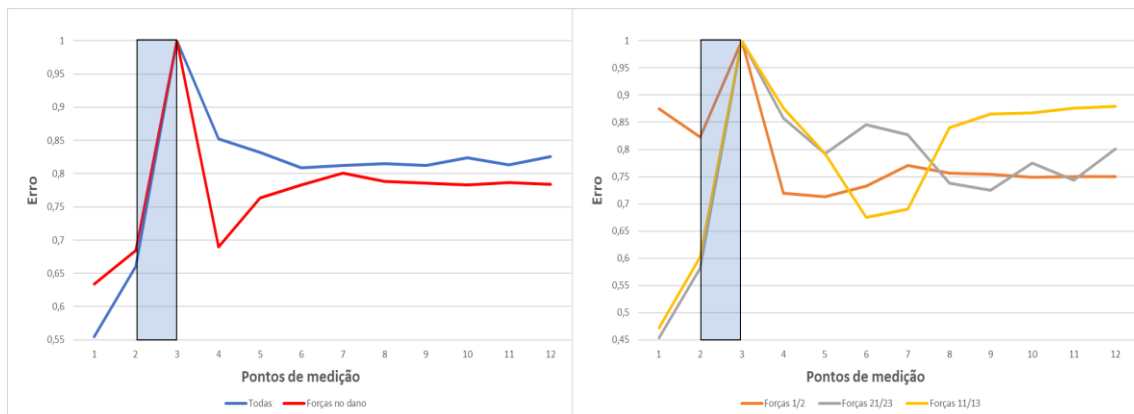


Figura 4.21 - Resultados para o indicador da Erro, considerando o dano a 14cm, com um redução de espessura 5%

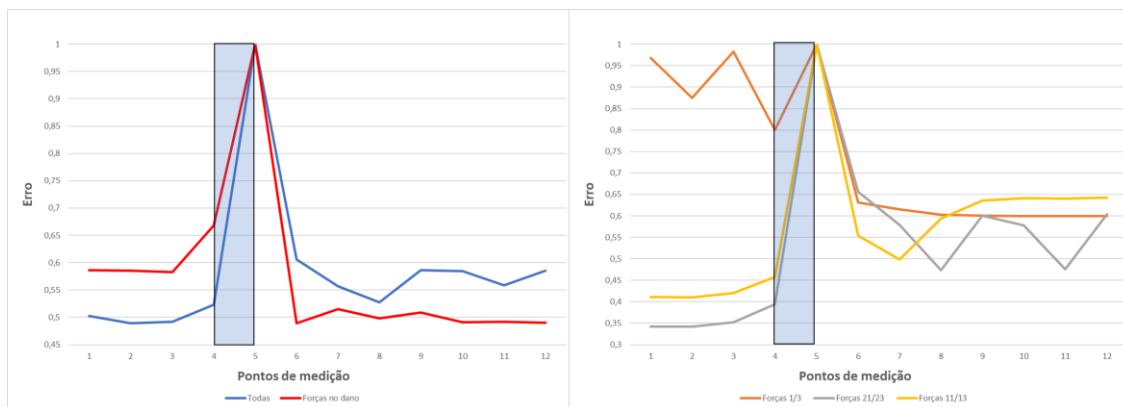


Figura 4.22 - Resultados para o indicador da Erro, considerando o dano a 34cm, com um redução de espessura 5%

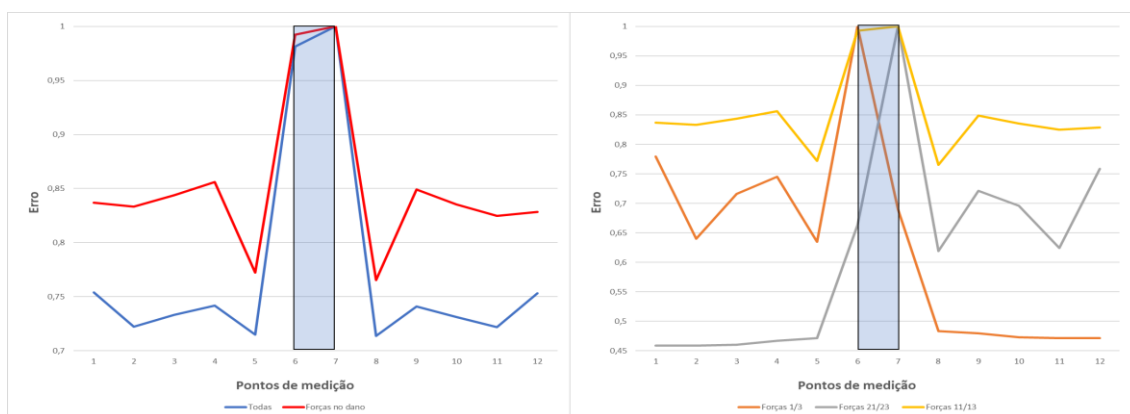


Figura 4.23 - Resultados para o indicador da Erro, considerando o dano a 50cm, com um redução de espessura 5%

Finalmente para o indicador do Coe, verificou-se que, para todas as localizações, à exceção do dano localizado a 50cm, os melhores resultados ocorriam quando se aplicavam todas as 12 forças ou forças longe do dano, destacando que foi ao aplicar as forças nos pontos 21 e 23 que se obtiveram os melhores resultados para este indicador, Figura 4.24. Para ponto no C.M., a aplicação das forças nos pontos 21 e 23 não possibilitou a obtenção de bons resultados, sendo estes obtidos apenas com a aplicação das forças no dano/forças nos pontos colocados a meio da viga, Figura 4.25.

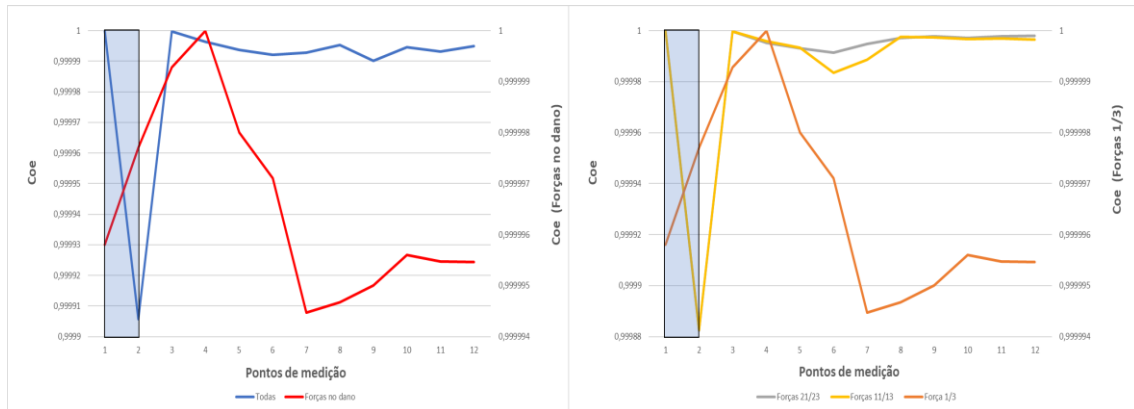


Figura 4.24 - Resultados para o indicador Coe, considerando o dano a 5cm, com um redução de espessura 5%

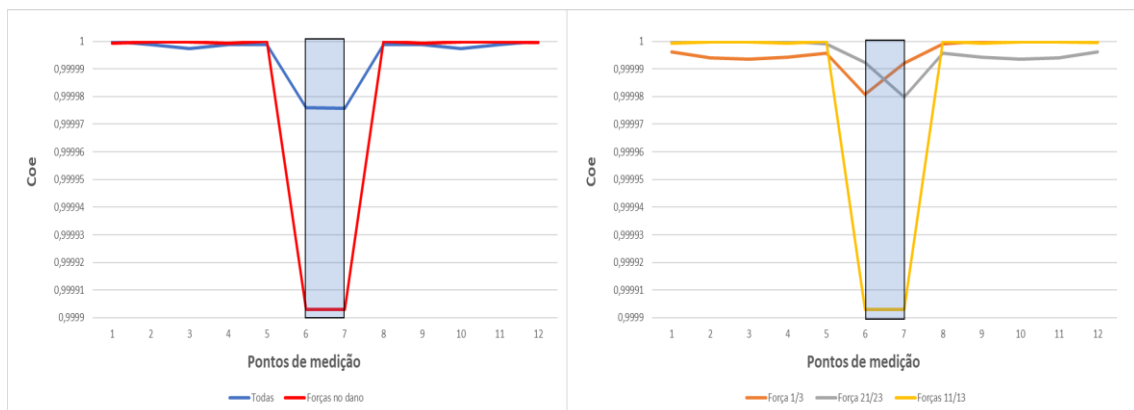


Figura 4.25 - Resultados para o indicador Coe, considerando o dano a 50cm, com um redução de espessura 5%

4.5 Caso de estudo 5 - Localização de vários danos em simultâneo

Após estudar a eficácia dos indicadores na localização de um único dano aplicado à viga, tentou perceber-se qual a sensibilidade dos mesmos para a deteção de vários danos em simultâneo. Na Tabela 4.20 estão indicadas as combinações de dano consideradas para este caso de estudo. Todos estes ensaios foram realizados considerando um ruído de 2%, para uma gama de frequência de 0,25-1250Hz e com um nível de dano que variou entre (2, 5 e 10) %.

Tabela 4.20 - Posição dos danos para ensaios com múltiplos danos

Ensaio	Posição dos danos (cm)	GDL envolvidos no dano
1	5 e 94	1/3-21/23
2	33 e 66	8/10-16/18
3	34 e 66	8/10-16/18
4	35 e 66	8/10-16/18
5	14 e 24	4/6/8
6	14 e 34	4/6-8/10

Os resultados para os ensaios indicados acima, são apresentados nas Tabela 4.21 e Tabela 4.22.

Tabela 4.21 - Quadro resumo da eficácia na localização de dois danos em simultâneo, ambos com 10% de redução da espessura, para cada indicador e localização, utilizando nas FRFs de translação

Translação	5/94cm	33/66cm	34/66cm	35/66cm	14/24cm	14/34cm
Razão						
Erro						
CSF						
Coe						

Tabela 4.22 - Quadro resumo da eficácia na localização de dois danos em simultâneo, ambos com 10% de redução da espessura, para cada indicador e localização, utilizando as FRFs de rotação

Rotação	5/94cm	33/66cm	34/66cm	35/66cm	14/24cm	14/34cm
Razão						
Erro						
CSF						
Coe						

Ao analisar os resultados de ambas as tabelas acima, concluiu-se que era possível localizar múltiplos danos numa viga. A exceção ocorreu no ensaio 5, onde nem com as FRFs de translação, nem com as de rotação foi possível localizar estes danos. De um modo geral, os resultados utilizando as rotações apresentam uma melhor eficácia na localização que os resultados utilizando as translações, o que se mostra evidente nas Figura 4.26 e Figura 4.27.

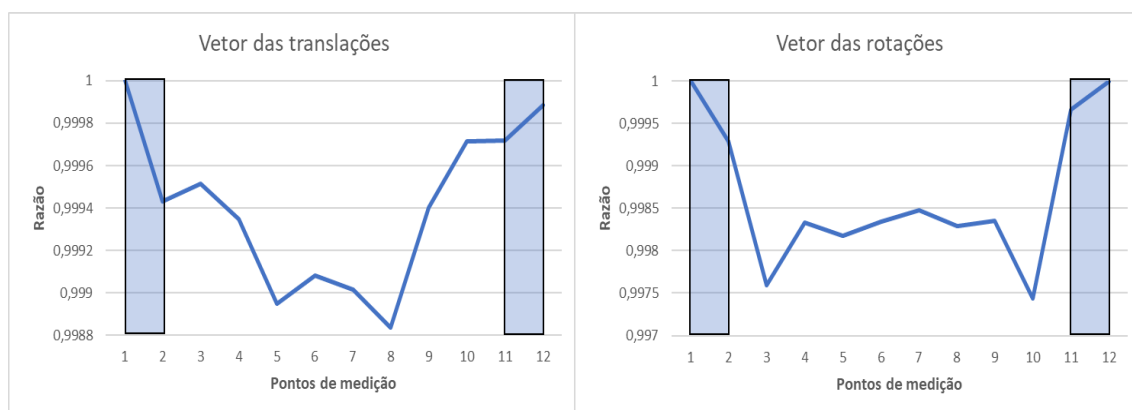


Figura 4.26 - Representação gráfica dos resultados obtidos, para o indicador da Razão, considerando o dano com uma redução de espessura de 10%, localizado a 5 e 94cm, relativamente à translação (esquerda) e rotação (direita)

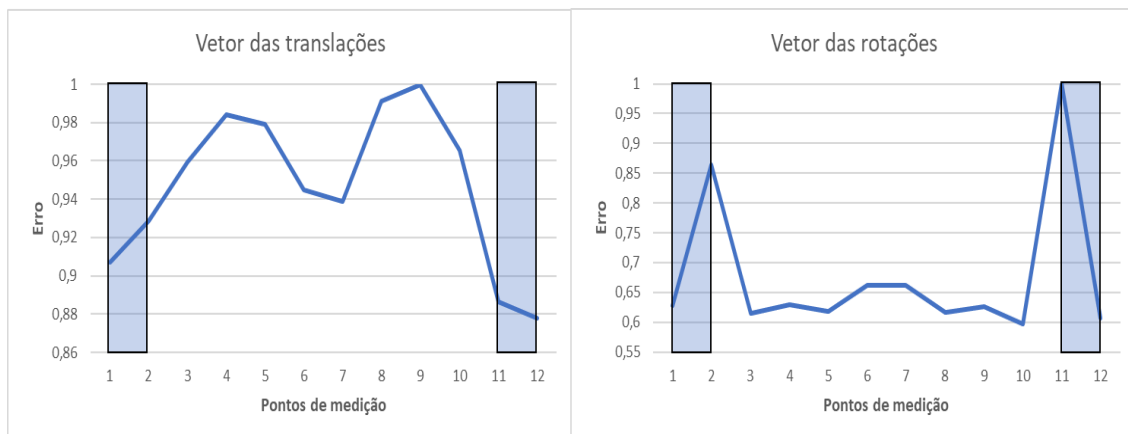


Figura 4.27 - Representação gráfica dos resultados obtidos, para o indicador do Erro, considerando o dano com uma redução de espessura de 10%, localizado a 5 e 94cm, relativamente à translação (esquerda) e rotação (direita)

Na Figura 4.28 é possível visualizar a representação dos resultados dos ensaios 2,3,4, obtidos com a aplicação do indicador Coe, com as FRFs de rotação.

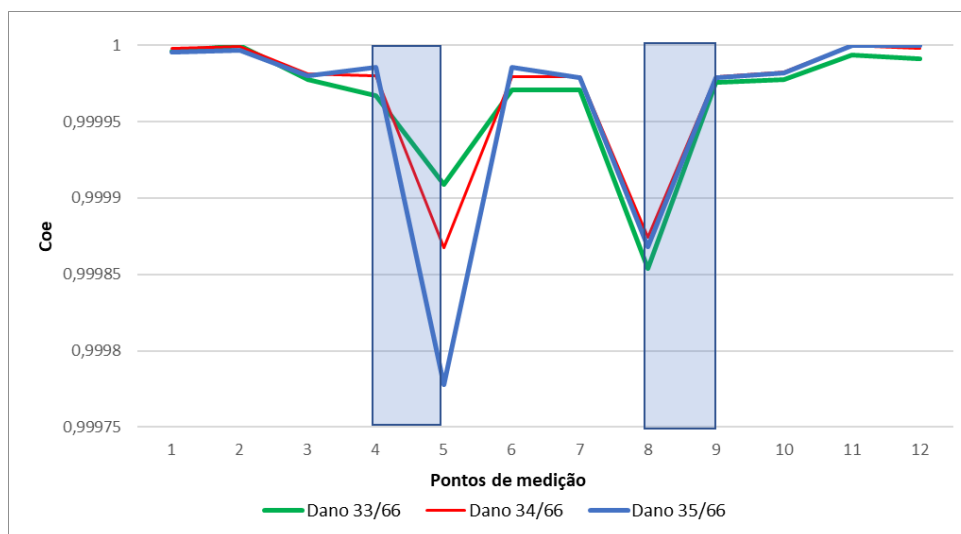


Figura 4.28 - Comparação entre danos simultâneos, alterando a posição de um deles ao longo do mesmo elemento, considerando o indicador Coe para as FRFs de rotação e um nível de dano de 10%

Nesta figura, é visível o efeito da alteração de um dos danos ao longo do elemento, mantendo o outro inalterado. Para danos totalmente simétricos o gráfico apresenta-se simétrico (curva a vermelho). No entanto, ao deslocar o dano, tanto para a direita (curva a azul) como para a esquerda

(cuva a verde), no mesmo elemento, o gráfico apresenta amplitudes diferentes, apesar de ambos os danos possuírem a mesma redução de espessura. Esta diferença apresenta-se como uma limitação, pois a simples análise do gráfico é insuficiente para se poder concluir se a variação das amplitudes é devida à variação da localização do dano no mesmo elemento ou devido ao facto de os danos produzidos se deverem a reduções de espessura diferentes.

Com o quinto ensaio, pretendia-se verificar o efeito da implementação de dois danos entre dois intervalos de medição consecutivos (colocando-se os danos entre três pontos de medição seguidos), de modo a perceber se os indicadores conseguiriam identificar os dois intervalos com dano. Na Figura 4.29 é exposto o resultado obtido com o indicador Coe utilizando as FRFs de rotação. Apesar de o dano estar dentro da zona afetada, não é possível perceber que existem dois danos nessa mesma zona. Dito isto, considerou-se que utilizando 12 pontos de medição não era possível localizar dois danos colocados entre dois pontos consecutivos.

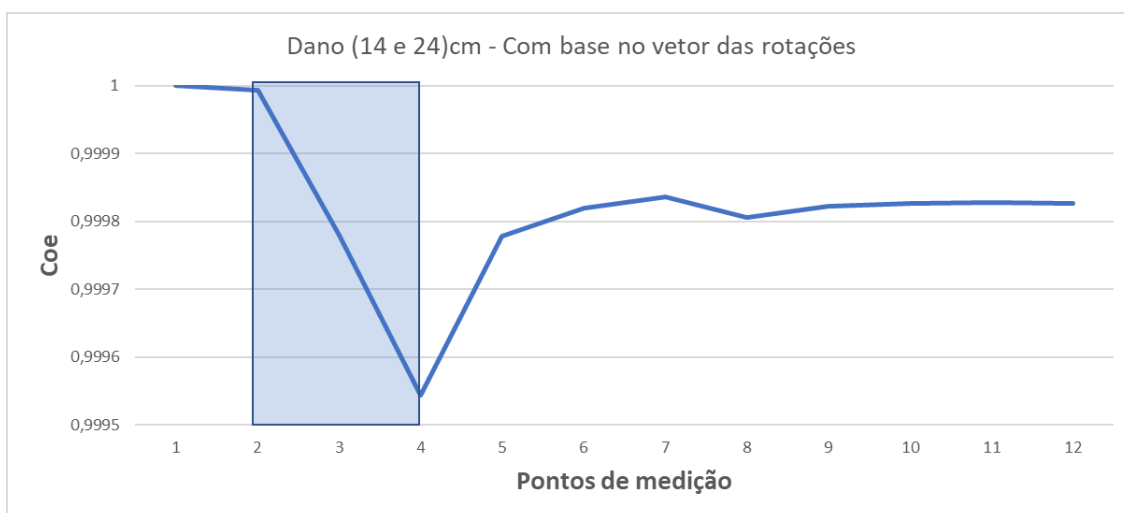


Figura 4.29 - Representação gráfica dos resultados do indicador Coe, base nas FRFs de rotação, para o caso do dano localizado a (14 e 24 cm), com uma redução de espessura de 10%.

Por fim, foi analisado um último caso, onde se colocaram dois danos: o primeiro entre os pontos de medição 2/3 e o segundo entre os pontos de medição 4/5. **Erro! A origem da referência não foi encontrada..** Na Figura 4.30 surge a representação gráfica do resultado obtido com o indicador Coe utilizando as rotações, 6º ensaio. Neste, foi possível identificar a localização de ambos os danos. Contudo, apesar de terem o mesmo nível de dano, o indicador não apresenta a mesma amplitude para ambos os danos.

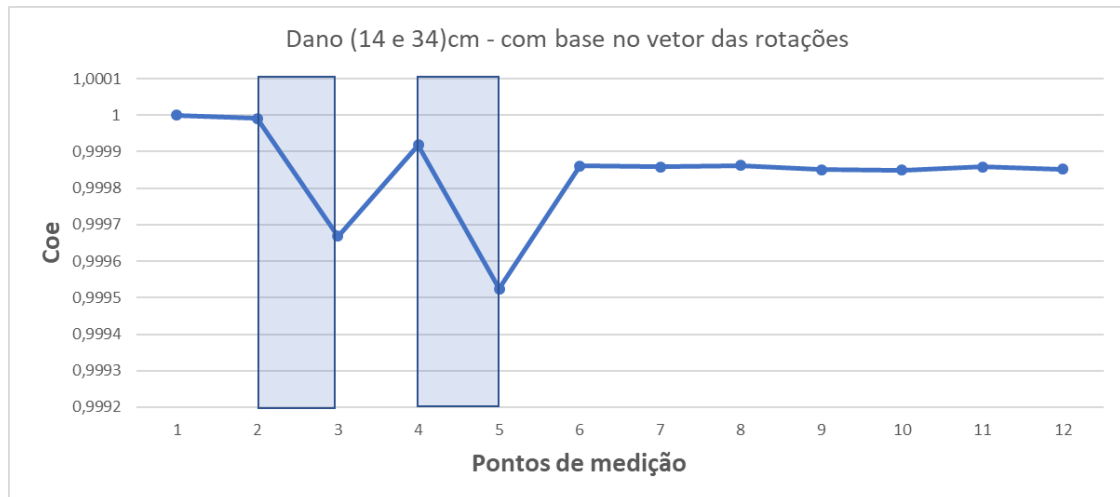


Figura 4.30 - Representação gráfica dos resultados do indicador Coe, com base nas FRFs de rotação, para o caso do dano localizado a (14 e 34 cm), com uma redução de espessura de 10%.

Em suma, para a estrutura em questão, foi possível identificar a localização de múltiplos danos em simultâneo, verificando-se que o indicador da Razão foi o único a conseguir localizar os danos, tanto usando as medições relativas às translações, como às rotações. Tal como se verificou na análise do subcapítulo 4.2, as rotações permitiram uma melhor identificação de dano para as mesmas condições de gama de frequência aplicada, ruído e amortecimento.

Todavia, é de realçar que não se conseguiu localizar danos entre sensores consecutivos, independentemente do indicador utilizado e da utilização das FRFs de translação ou rotação.

4.6 Caso de estudo 6 - Influência do número de pontos de medição

Neste item, foi estudado o efeito de um maior ou menor número de pontos de medição na correta localização do dano. Como foi considerado anteriormente que cada ponto de medição pode também ser um ponto de aplicação de forças, aumentando o primeiro aumentamos também a possibilidade de aumentar o segundo.

Neste caso de estudo, pretendeu-se comparar o efeito produzido ao utilizar 22 pontos de medição com 22 forças aplicadas ou ao utilizar 12 pontos de medição com 12 forças aplicadas. Em adição, utilizando os 22 pontos de medição, estudou-se o efeito da existência de múltiplos danos, mais concretamente, danos consecutivos, onde a utilização de 12 pontos de medição não mostrou ser possível fazer a correta localização do dano, como descrito no subcapítulo 4.3.

Os novos pontos de medição foram colocados no ponto médio de cada dois pontos de medição anteriormente considerados, sendo a localização dos 22 pontos de medição expressa na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 - Localização dos novos acelerómetros utilizados

Nº Sensor	GLD associado	Localização (cm)	Nº Sensor	GLD associado	Localização (cm)
1	1/2	0,5	12	23/24	54,5
2	3/4	5	13	25/26	59
3	5/6	9,5	14	27/28	63,5
4	7/8	14	15	29/30	68
5	9/10	18,5	16	31/32	72,5
6	11/12	23	17	33/34	77
7	13/14	27,5	18	35/36	81,5
8	15/16	32	19	37/38	86
9	17/18	36,5	20	39/40	90,5
10	19/20	41	21	41/42	95
11	21/22	45,5	22	43/44	99,5

Ao observar a posição de todos os sensores utilizados, verifica-se que existe um par de sensores com um intervalo maior que os restantes (par 12-13), tal deve-se ao facto de não ter sido introduzido um sensor no meio da viga (50 cm). Este ponto revelou-se um ponto de medição a evitar devido ao facto de ao aplicar uma força no C.M. a viga apresentava um movimento do tipo corpo rígido, não existindo rotações a medir.

Nas Tabela 4.24 e Tabela 4.25 estão indicados os resultados obtidos, para a localização de dano considerando 22 pontos de medição e 22 forças aplicadas, utilizando as FRFs relativas às translações e rotações, respetivamente.

Tabela 4.24 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 10% de redução da espessura, para cada indicador e localização baseado nas FRFs de translação, considerando 22 pontos de medição

Translação	5cm	14cm	24cm	34cm	50cm
Razão					
Erro					
Coe e CSF					

Tabela 4.25 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 10% de redução da espessura, para cada indicador e localização baseado nas FRFs de rotação, considerando 22 pontos de medição

Rotação	5cm	14cm	24cm	34cm	50cm
Razão					
Erro					
Coe e CSF					

Analisando ambas as tabelas acima, verifica-se que globalmente não se obteve um maior número de localizações do dano, quando comparado com as Tabela 4.5 e Tabela 4.6, presentes no subcapítulo 4.2. Apesar de existirem casos onde com a utilização dos 22 pontos de medição tornou possível localizar o dano (exemplo: ponto 5cm para as translações) também existem pontos onde já não é possível efetuar a localização do dano (exemplo: ponto 5cm para as rotações).

Todavia é de realçar que para os ensaios considerando as FRFs de rotação, onde não foi possível localizar o dano (caso 5 e 14 cm), esta impossibilidade pode ser devida ao facto de o dano estar localizado na posição exata dos pontos de medição.

Fazendo agora uma comparação dos gráficos considerando 22 pontos de medição e 22 forças aplicadas com os gráficos obtidos no subcapítulo 4.2 (12 pontos de medição e 12 forças aplicadas) pode-se concluir que ao utilizar um maior número de pontos de medição é possível restringir a zona admissível à localização do dano. Na Figura 4.31 está representada, para o indicador da Razão, a comparação entre os resultados obtidos através do ensaio com 12 acelerómetros (curva a vermelho) e com 22 (curva a azul). Para este ensaio foi considerado um dano localizado a 14cm, que corresponde à localização do ponto de medição 4, com uma redução de espessura de 10%.

Nesta figura é visível, o facto que a utilização de 22 pontos de medição permite uma localização mais exata do dano, restringindo a área de onde este possa estar.

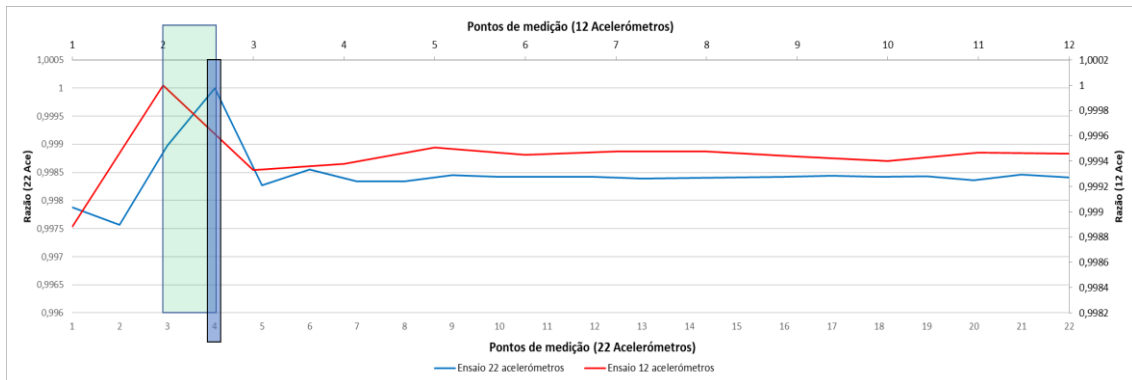


Figura 4.31 - Comparação entre os resultados da Razão, considerando FRFs de translação, com 22 ou 12 acelerómetros, considerando um dano localizado a 14cm, com uma redução de espessura de 10%

Em suma, o aumento do número de pontos de medição não traz grandes vantagens em termos da eficácia da localização do dano, no entanto permite uma melhor exatidão para a mesma.

Estudou-se ainda o caso de se utilizarem os 22 pontos de medição aplicando as forças apenas nos pontos de medição utilizados no subcapítulo 4.2 (pontos de medição correspondentes ao caso dos 12 pontos de medição). Todavia, ao fazer a comparação entre o uso das 22 forças com o das somente 12 forças aplicadas, verificou-se que não existiam diferenças significativas quanto à localização, sendo os gráficos de ambos os casos muito similares, notório na Figura 4.32.

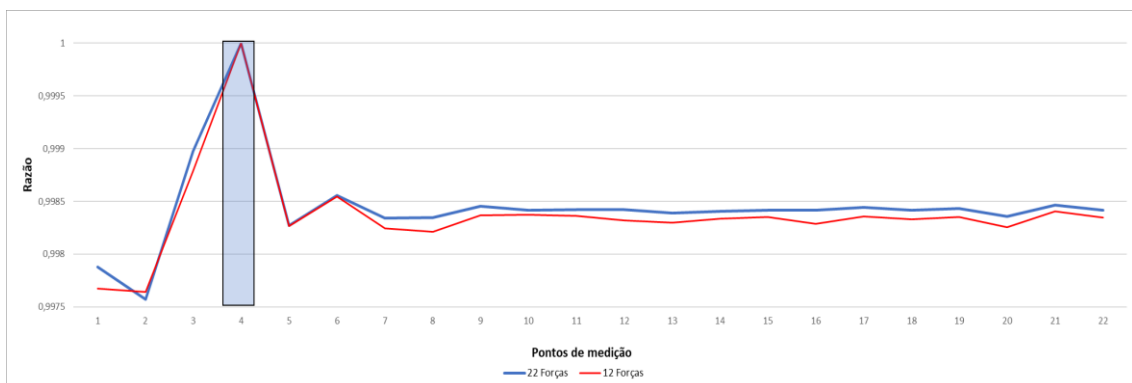


Figura 4.32 - Comparação entre os resultados da Razão, considerando FRFs de translação, com 22 acelerómetros, para o caso de 22 e 12 forças, considerando um dano localizado a 14cm, com uma redução de espessura de 10%

Por fim, como foi referido anteriormente, tentou-se perceber se era possível localizar múltiplos danos, próximos um do outro, considerando a localização dos danos a (14 e 24 cm), caso que foi estudado no subcapítulo 4.3, onde se conclui que para os 12 pontos de medição não era possível efetuar a localização. Na Tabela 4.26, são apresentados os resultados obtidos para as localizações escolhidas e utilizando um dano com uma redução de espessura de 10%.

Tabela 4.26 - Quadro resumo da eficácia na localização de um dano com 10% de redução da espessura, para cada indicador considerando dois danos localizados a (14 e 24)cm e 22 pontos de medição

	Razão	Erro	CSF	Coe
Translação				
Rotação				

Comparando a tabela acima, com os resultados das Tabela 4.21 e Tabela 4.22, referentes ao ensaio do dano em 14 e 24cm para 12 pontos de medição (subcapítulo 4.2), é visível que ao utilizar os 22 pontos de medição, apesar se não se verificar para todos os indicadores, já é possível localizar estes dois danos em simultâneo. Tal, deve-se à quantidade de informação adicional (FRFs) que a adição de sensores permite. Estes resultados vêm então reforçar a ideia de que a utilização de mais sensores é benéfica, pois permite restringir a vizinhança de um possível dano, permitindo assim uma localização mais exata.

Devido ao facto, de para os 22 pontos de medição, os danos de (14 e 24 cm) não serem em sensores consecutivos, como acontece para o caso dos 12 sensores, fez-se um último ensaio considerando os danos a (16 e 20 cm), sendo estes situados entre os sensores 4/5 e 5/6, respetivamente. Para estes danos, não foi possível efetuar a localização dos mesmo, independentemente do indicador e do vetor utilizado. Concluindo-se então que, mesmo adicionando sensores à viga, os indicadores não conseguem localizar danos consecutivos.

5 Conclusão

A presente dissertação teve como principal objetivo investigar o potencial da utilização das FRFs na detecção, localização e quantificação relativa de dano numa estrutura.

A realização deste trabalho foi feita em duas etapas. Primeiramente, efetuou-se a modelação numérica de uma viga considerada livre-livre, com base no Método dos Elementos Finitos, obtendo-se assim as FRFs da mesma, quer em relação aos graus de liberdade referentes às translações como às rotações, considerando inicialmente que eram aplicadas à viga tantas forças (uma de cada vez) quanto os pontos de medição considerados (12 pontos de medição).

Posteriormente, desenvolveu-se uma metodologia que permitiu aplicar vários Indicadores (Razão, Erro, CSF e Coe) às FRFs determinadas para a estrutura considerando ou não a existência de dano na mesma. A aplicação dos Indicadores tinha como intuito perceber qual a sua real capacidade de permitir uma correta identificação do dano. Os indicadores testavam, cada um da sua forma, a correlação existente entre as curvas das FRFs com e sem dano, tanto para as FRFs referentes à translação como à rotação.

Analisaram-se então alguns fatores que pudessem ter impacto na detecção de dano.

De modo a poder comparar os resultados obtidos numericamente com os que virão a ser obtidos experimentalmente, introduziu-se uma percentagem de ruído aleatório (2%) nas FRFs determinadas, por forma a verificar qual o seu real impacto na correta detecção do dano. Verificou-se que para danos aplicados, em que a redução da espessura do elemento considerado com dano era superior a 5% não se verificavam discrepâncias assinaláveis entre os resultados obtidos com ou sem a presença de ruído. No entanto, para danos muito pequenos (<5%), os resultados apresentaram grandes disparidades. Tal poderá ser explicado pela possível semelhança dos efeitos produzidos pelo ruído e pelo dano, quando a percentagem de dano aplicada é muito reduzida, ou seja, o efeito produzido pelo ruído pode ser semelhante ao efeito causado pelo dano, não sendo possível assim localizá-lo. É ainda de referir que a afetação por parte do ruído não é igual, nem para os dois tipos de FRFs utilizadas (translação/rotação), nem para os vários indicadores. Constatou-se que, de entre os dois tipos de FRFs estudadas, as de rotação foram as menos afetadas pelo ruído. No que concerne aos indicadores, verificou-se que a Razão foi o indicador mais afetado, quando somente um ensaio é realizado. Por forma a diminuir o efeito negativo que a presença de ruído presente nas FRFs/indicadores possa causar na localização do dano,

sobretudo para danos mais pequenos, utilizou-se a média de cinco FRFs medidas por cada ponto de medição, para cada uma das forças de excitação, tendo-se conseguido melhorar bastante os resultados de localização do dano.

De seguida, pretendeu-se estudar a sensibilidade dos indicadores à variação da localização do dano e do nível de dano aplicado. Ao analisar os resultados obtidos, concluiu-se que as FRFs de rotação, independentemente do indicador aplicado, permitiram uma identificação/localização do dano para todas as localizações e todos os níveis (reduções de espessura) de dano estudados, considerando a gama de frequências em estudo 0,25-1250Hz. Relativamente à eficácia dos indicadores, a Razão destacou-se como sendo o mais robusto, permitindo, de um modo geral, localizar o dano tanto com as FRFs, quer de translação quer de rotação.

Em adição, é ainda de realçar que foi possível efetuar uma quantificação relativa do dano. Através de duas medições espaçadas no tempo, e aplicando a metodologia descrita no subcapítulo 3.6.2., é possível perceber se existiu alguma evolução do dano, comparando os dois ensaios. Esta Quantificação é deveras importante pois permite uma monitorização contínua da estrutura.

Seguidamente, foi estudado o efeito da variação da gama de frequências na identificação do dano. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que as FRFs de rotação melhoravam para gamas de frequência mais altas. No entanto, o mesmo não ocorre para as translações, verificando-se uma melhoria nos resultados aquando da diminuição da gama de frequências. Tal fenómeno não pode, no entanto, generalizar-se, porque não se verificou para algumas situações de localização do dano.

No que diz respeito ao efeito da escolha do número e localização de forças a aplicar à estrutura, conclui-se que, quando eram aplicadas forças próximas do elemento danificado conseguiam-se obter localizações claras do dano. No entanto, dada a impossibilidade de saber *a priori* a real localização do mesmo, a melhor estratégia a utilizar será a distribuição das forças de excitação ao longo da estrutura a estudar.

Posteriormente, quis-se perceber qual a capacidade dos indicadores de localizarem múltiplos danos. Com base na análise dos resultados obtidos, é de destacar, uma vez mais, as FRFs de rotação como meio mais eficaz na localização de múltiplos danos. No entanto, esta capacidade de localização apenas foi notória para danos aplicados em elementos não consecutivos. No caso de danos situados em elementos consecutivos, não foi possível localizá-los, independentemente do indicador e/ou das FRFs utilizadas. Adicionalmente, na localização de danos simétricos, com iguais reduções de espessura, constatou-se que os gráficos eram também simétricos. Contudo, ao

variar a localização de apenas um dos danos no mesmo elemento, deixou de se verificar esta simetria, não sendo possível distinguir esta situação, do caso de danos simétricos com reduções de espessura diferentes.

Por fim, investigou-se o efeito de adicionar pontos de medição à estrutura, na identificação do dano. Primeiramente, estudou-se o efeito de se utilizarem 22 sensores e 22 forças, em oposição aos 12 pontos e 12 forças mencionados nos ensaios acima descritos. Na análise destes resultados, verificou-se que, com um aumento do número de pontos de medição, foi possível restringir melhor a zona da localização do dano. No entanto, a utilização de um número maior de pontos de medição não permitiu localizar um maior número de situações de dano, quando comparada com a utilização de 12 pontos de medição. Posteriormente, foi feita a comparação entre a utilização de 22 sensores com 22 forças e a utilização de 22 sensores com apenas 12 forças, sendo estas aplicadas nos mesmos nós que no caso da utilização dos 12 sensores. A partir dos resultados obtidos, constatou-se que a utilização das 12 forças adicionais não apresentava vantagens significativas na deteção e localização do dano. Conclui-se, assim, que com a adição de pontos de medição é possível efetuar uma localização mais exata, não sendo necessário associar uma força a cada sensor utilizado, poupando assim custo e tempo no processo de localização de dano.

Em suma, admite-se que foram alcançados todos os objetivos propostos para esta dissertação, acreditando-se que será um contributo de valor para a área da identificação de dano, realçando o potencial das FRFs na mesma.

5.1 Trabalhos propostos

No seguimento do estudo desenvolvido nesta dissertação, é de realçar a necessidade de validar as conclusões retiradas, no que diz respeito à metodologia utilizada e à aplicabilidade das mesmas a casos concretos.

Primeiramente, propõe-se a realização de casos de estudo experimentais, de modo a que seja possível verificar a concordância dos resultados obtidos numericamente.

Adicionalmente, por forma a tentar ultrapassar a dificuldade inerente à medição de rotações, na componente experimental, sugere-se a utilização de modelos de expansão. Trabalhos científicos apresentados [28] referem a possibilidade de, com a aplicação destes métodos, ser possível

determinar FRFs em pontos/coordenadas em que a sua medição não foi efetuada, utilizando o conhecimento de FRFs medidas noutros pontos/coordenadas. Assim sendo importa avaliar a possibilidade de com a aplicação destes modelos conseguir determinar as FRFs de Rotação a partir do conhecimento das FRFs de Translação.

Por último, urge ainda a necessidade de verificar a aplicabilidade dos resultados obtidos ao longo da investigação, a casos de estudo mais complexos e, eventualmente, representativos do quotidiano das mais diversas áreas de engenharia.

6 Bibliografia

1. Zaher M.S.A.A, *An integrated vibration based structural health monitoring system*, Carleton University, Ottawa, Canada, PhD thesis, (2002).
2. T. Santos, *Sebenta de Processos Avançados de Fabrico e Ensaios Não Destrutivos*, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade NOVA de Lisboa, Monte da Caparica, (2017).
3. R. P. Bandara, T. HT. Chan, D. P. Thambiratnam, *Structural damage detection method using frequency response functions*, Sage Journals, Vol. 13, No. 4, (2014), pp. 418-429
4. N. Bakhary, H. Hao, A. J. Deeks, *Damage detection using artificial neural network with consideration of uncertainties*, Engineering Structures, Vol. 29, No. 11, (2007), pp. 2806–2815.
5. R. P. C. Sampaio, N. M. M. Maia, e J. M. M. Silva, *Damage detection using the frequency-response-function curvature method*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 226, No. 5, (1999), pp. 1029–1042.
6. R. A. B. Almeida, A. P.V. Urgueira, J. D. P. Morais, N. M. M. Maia, *An assessment of frequency response curvature methods for damage localization*, Proc. of Inter. Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2014), Leuven, Belgium, (2014).
7. Rytter, *Vibration based inspection of civil engineering structures*, Aalborg University, Denmark, PhD thesis (1993).
8. N.-G. Park e Y. Park, *Identification of damage on a substructure with measured frequency response functions*, Journal of Mechanical Science Technology, Vol. 19, No. 10, Springer (2005), pp. 1891–1901.
9. J. D. P. Morais, *Deteção e localização de dano em estruturas*, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, Portugal, Master thesis, (2014).
10. S. Doebling, C. Farrar, M. Prime, e D. Shevits, *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review*, Los Alamos National Laboratory, USA, (1996).

11. J. M. Lifshitz e A. Rotem, *Determination of reinforcement unbonding of composites by a vibration technique*, Journal of Composite Materials, Vol. 3, No. 3, (1969), pp. 412–423.
12. M. J. C. Safara, *Deteção de dano em estruturas reticuladas utilizando análise de vibrações*, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, Portugal, Master thesis, (2016).
13. O. S. Salawu, *Detection of structural damage through changes in frequency: a review*, Engineering Structures, Vol. 19, No. 9, (1997), pp. 718–723.
14. J. Sinou, *A Review of damage detection and health monitoring of mechanical systems from changes in the measurement of linear and non-linear vibrations*, Mechanical Vibrations: Measurement, Effects and Control, (2009), pp. 643–702.
15. Messina, E. J. Williams, e T. Contursi, *Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 216, No. 5, (1998), pp. 791–808.
16. N. Lieven e D. Ewins, *Spatial correlation of mode shapes, the Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC)*, Proceedings of the 4th International Modal Analysis Conference, (1988), pp. 690–695.
17. S. H. Yoo, H. K. Kwak, e B. S. Kim, *Detection and location of a crack in a plate using modal analysis*, Proceedings of 17th International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida, (1999), pp. 1902–1908.
18. N. M. M. Maia, R. P. C. Sampaio e J. M. M. Silva, *Detecção e localização de danos estruturais usando funções de resposta em frequência*, disponível em: “http://www-ext.lnec.pt/APAET/pdf/Rev_2_A7.pdf”, acesso em: 22 set. 2019
19. K. Pandey, M. Biswas, e M. M. Samman, *Damage detection from changes in curvature mode shapes*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 145, No. 2, (1991), pp. 321–332.
20. Y. K. Ho e D. Ewins, *On the structural damage identification with mode shapes*, Proceedings of the European COST F3 Conference on System Identification & Structural Health Monitoring, Universidad Politecnica de Madrid, Spain, (2000), pp. 677–684.
21. N. Stubbs, J.-T. Kim, e C. R. Farrar, *Field verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm*, Proceedings of the XIII International Modal Analysis Conference, Nashville, USA, (1995), pp. 210–210.

22. N. M. M. Maia, J. M. M. Silva, J. He, N. A. J. Lieven, R. M. Lin, G. W. Skingle, W.-M. To, A. P. V. Urgueira, *Theoretical and experimental modal analysis*. Research Studies Press Limited, (1997).
23. Z. Wang, R. M. Lin, e M. K. Lim, *Structural damage detection using measured FRF data*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 147, No. 1–2, (1997) pp. 187–197.
24. J. V. Araújo dos Santos, C. M. Mota Soares, C. A. Mota Soares, e N. M. M. Maia, *Structural damage identification in laminated structures using FRF data*, Composite Structures, Vol. 67, No. 2, (2005), pp. 239–249.
25. U. Lee e J. Shin, *A frequency response function-based structural damage identification method*, Computers & Structures, Vol. 80, No. 2, (2002), pp. 117–132.
26. M. P. Limongelli, *Frequency response function interpolation for damage detection under changing environment*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 24, (2010), pp. 2898–2913.
27. Bovio, V. Massimo, e L. Lecce, *Innovative method for damage identification and structural health monitoring based on vibration measurements*, Proc. of the 9th European Conference on NDT, (2006), pp. 1-9.
28. T. A. N. Silva, *Development and implementation of model updating techniques in structural dynamics*, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, PhD thesis, (2015)
29. N. M. M. Maia, J. M. M. Silva, e R. P. C. Sampaio, *Localization of damage using curvature of the frequency response functions*, Proc. of the 15th Inter. Modal Analysis Conference, Orlando, Flórida, (1997), pp. 942–946.
30. N. M. M. Maia, J. M. M. Silva, E. A. M. Almas, e R. P. C. Sampaio, “*Damage detection in structures: from mode shape to frequency response function methods*”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 17, No. 3, (2003), pp. 489–498.
31. X. Liu, N. A. J. Lieven, e P. J. Escamilla-Ambrosio, *Frequency response function shape-based methods for structural damage localization*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 23, No. 4, (2009), pp. 1243–1259.
32. D.J. Ewins, W. Liu, *Transmissibility properties of MDOF system*, em Proc. of the 16th International Modal Analysis Conference (IMACXVI), Santa Barbara, California, USA, 1998, pp.847-854.

33. P. Varoto, K. McConnell, *Single point vs. multi point acceleration transmissibility concepts in vibration testing*, em *Proc. of the 16th International Modal Analysis Conference (IMACXVI)*, Santa Barbara, California, USA, 1998, pp.83-90.
34. A.M.R. Ribeiro, *On the generalization of the transmissibility concept*, *Proc. of the NATO/ASI Conference on Modal Analysis and Testing*, Sesimbra, Portugal, (1998).
35. N. M. M. Maia, A. P. V. Urgueira, e R. A. B. Almeida, *Whys and wherefores of transmissibility*, em *Vibration Analysis and Control - New Trends and Developments*, F. Beltran-Carbajal, Ed. InTech, (2011).
36. Devriendt, G. De Sitter, S. Vanlanduit, P. Guillaume, *Operational modal analysis in the presence of harmonic excitations by the use of transmissibility measurements*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.23, No. 3, (2009), pp. 621-635.
37. N. M. M. Maia, R. A. B. Almeida, A. P. V. Urgueira, e R. P. C. Sampaio, *Damage detection and quantification using transmissibility*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, No. 7, (2011), pp. 2475–2483.
38. R. A. B. Almeida, A. P. V. Urgueira, e N. M. M. Maia, *Using Transmissibility to Detect and Quantify Structural Damage*, *Proc. of of Inter. Conference on Engineering Dynamics (ICEDyn2011)*, Tavira, Algarve, Portugal, (2011).
39. P. Coelho, *Sebenta de Métodos Computacionais em Engenharia Mecânica*, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade NOVA de Lisboa, Monte da Caparica, Portugal, (2018).
40. C. M. R. S. Amaral, *Localização e quantificação de dano com recurso às FRFs*, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade NOVA de Lisboa, Monte da Caparica, Portugal, Master thesis, (2017).
41. T. Marinone e A. Moya, *Comparison of FRF Correlation Techniques*, em *Model Validation and Uncertainty Quantification*, Vol. 3, H. S. Atamturktur, B. Moaveni, C. Papadimitriou, e T. Schoenherr, Ed. Springer, (2005), pp. 299-309.
42. Drozg, J. Rogelj, G. Čepón, e M. Boltežar, *On the performance of direct piezoelectric rotational accelerometers in experimental structural Dynamics*, *Measurement*, Vol. 127, (2018).